



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA  
MESTRADO EM ENERGIA

RENATO ROCHA BATISTA

**ROTAS DE APROVEITAMENTO TECNOLÓGICO DE  
RESÍDUO ORGÂNICO AGRÍCOLA: CASCA DE  
COCO, CASCA DE CACAU E CASCA DE CAFÉ –  
DESTINADAS À GERAÇÃO DE ENERGIA**

São Mateus - ES

2014

RENATO ROCHA BATISTA

**ROTAS DE APROVEITAMENTO TECNOLÓGICO DE  
RESÍDUO ORGÂNICO AGRÍCOLA: CASCA DE  
COCO, CASCA DE CACAU E CASCA DE CAFÉ –  
DESTINADAS À GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia do Centro Universitário do Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia na Área de concentração Multidisciplinar em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche

Co-orientador (a): Profa. Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves

São Mateus - ES, Brasil

Março, 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

B333r Batista, Renato Rocha, 1987-  
Rotas de aproveitamento tecnológico de resíduo orgânico agrícola : casca de coco, casca de cacau e casca de café – destinadas à geração de energia / Renato Rocha Batista. – 2014. 108 f. : il.

Orientador: Leonardo da Silva Arrieche.

Coorientador: Gisele de Lorena Diniz Chaves.

Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Digestão anaeróbia. 2. Combustão. 3. Pirólise. 4. Fluxogramas. 5. Heurística. I. Arrieche, Leonardo Silva. II. Chaves, Gisele de Lorena Diniz. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9


---

# ROTAS DE APROVEITAMENTO TECNOLÓGICO DE RESÍDUO ORGÂNICO AGRÍCOLA: CASCA DE COCO, CASCA DE CACAU E CASCA DE CAFÉ - DESTINADAS À GERAÇÃO DE ENERGIA

**RENATO ROCHA BATISTA**


Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada: 06/03/2014.



---

Prof. Dr. Demeval José Mazzini Sartori  
Universidade Federal de São Carlos




---

Prof. Dr. Taisa Shimosakai de Lira  
Universidade Federal do Espírito Santo



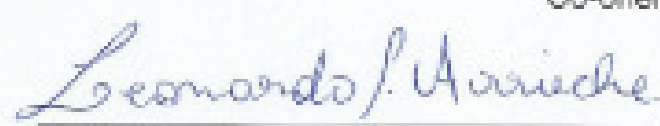
---

Prof. Dr. Marcelo Silveira Bacelos  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Prof. Dr. Gisele de Lorena Diniz  
Chaves  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Co-orientadora



---

Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche  
Universidade Federal do Espírito Santo  
(Orientador)

RENATO ROCHA BATISTA

**ROTAS DE APROVEITAMENTO TECNOLÓGICO DE RESÍDUO ORGÂNICO  
AGRÍCOLA: CASCA DE COCO, CASCA DE CACAU E CASCA DE CAFÉ –  
DESTINADAS À GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Energia, área de concentração em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Profa. Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Co-orientadora

---

Prof. Dr. Marcelo Silveira Bacelos  
Professor do PPGEN  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Profa. Dra. Taísa Shimosakai de Lira  
Professora do PPGEN  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori  
Membro externo  
Universidade Federal de São Carlos

*Dedico esse trabalho de dissertação à minha família, a Deus e aos cientistas Newton, Einsten, Marie Curie, Reynolds, Robert H. Perry e demais colaboradores que contribuíram para explicar parte desse mundo misterioso por meio de postulados e conhecimentos científicos - pessoas da sociedade, antepassados e presentes, que me inspiro para caminhar nessa carreira fabulosa e sem fronteiras, a engenharia de processos. Êxito na expansão dessas conquistas...*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força e estímulo nessa caminhada pelos trilhos da ciência. Caminhos que não têm fim para aprimorar o conhecimento.

Aos meus pais Emir Rodrigues Batista e Izabel Cristina Cavalcanti Rocha, pela fantástica oportunidade que me forneceram, no que diz respeito a me mostrar o caminho da educação escolar como fator de independência para um futuro próspero, e pelos ensinamentos de perseverança, desempenho, honestidade e coragem para enfrentar os desafios que o destino propõe.

Aos meus irmãos Rodrigo Rocha Batista e Emily Rocha Batista, que me apoiaram nos momentos de dificuldade que enfrentei durante a vida escolar até o início da graduação, quando a partir de então, os desafios se apresentaram ainda maiores quando me deparei com moradia em comunidade de alojamento no *campus* Seropédica-RJ. Graças a Deus, mesmo com as dificuldades, obtive desempenho satisfatório na graduação. Como era de se esperar, mesmo formando vieram dificuldades do tipo greve, que ameaçava atrasar a colação de grau. Diante da possibilidade de entrar com processo de adiantamento da colação de grau devido a regularidade durante a graduação e ao ter obtido aprovação no Programa de Mestrado da Universidade Federal do Espírito Santo (CEUNES-UFES) – Linha de pesquisa: Energia, venho continuando os estudos no Centro Norte Universitário da UFES, na cidade de São Mateus, desde o dia 20 de agosto de 2012.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação da UFES: Professor Doutor Leonardo da Silva Arrieche, Professora Doutora Gisele de Lorena Diniz Chaves, Professor Doutor Marcelo Silveira Bacelos, Proa. Dra. Taísa Shimosakai de Lira e, membro externo da banca avaliadora vinculado à Universidade Federal de São Carlos, Professor Doutor Demerval José Mazzini Sartori, que se dispuseram a avaliar o presente trabalho de dissertação e sobretudo fornecer conselhos e argumentos para correções e adaptações do documento de forma condizente com o objetivo proposto pela temática em estudo.

Aos professores doutores Fábio Ressel, Ana Beatriz, Laura Pinotti, Marielce Tosta, Wanderlei Cardoso, e demais professores do Departamento de Engenharias e Tecnologia que contribuíram com a minha formação.

À aluna de iniciação científica Andréia Zanetti, que muito contribuiu para a realização dos experimentos.

Aos colegas de mestrado Patrick Araújo de Jesus, Jardel Leno Zancanella Melo, Karla Rossini G. Santos, Renan Simões, Dayan Bissoli, Wilson Obed, Rogério Danieletto Teixeira, Flavio Tongo, Daniel Landi, Pedro Junior Zucatelli, Anderson, Nilza Izabel Matavel, que fizeram disciplinas do mestrado na mesma turma.

À secretaria de Pós-graduação (SUPGRAD), sob trabalhos de Josiane Baldo como responsável pelo programa de Energia, que a todo momento procurou nos manter informados quanto a eventos, acontecimentos e readaptações de calendário.

Aos meus amigos Paulo Sérgio Nobre Mattos, Débora Demoney, Érika Lorena, Márcio Cypriano, Fernando Meriguetti, Vagner Cordeiro, Marcus Vinicius Standford, Arseniy Zubkovskiy, dentre outros, que ao longo desses anos de graduação e pós-graduação Mestrado Stricto Senso, sempre procuraram transmitir otimismo para eu suportar as inúmeras dificuldades.

À Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

Ao professor Dr. Leonardo da Silva Arrieche, orientador e à professora Dr. Gisele Chaves, co-orientadora que sempre motivaram na persistência da continuidade dos trabalhos de experimentos e escrita da dissertação, apesar das dificuldades e das provas, além de terem tido imensa paciência e ter contribuído muito para a qualidade deste trabalho.

Além disso, vale ressaltar também a importância de outros colegas que conheci no *campus* de São Mateus, que de alguma forma me forneceram palavras de apoio nessa caminhada que ao meu ver, nunca terminará, ou seja, a conquista do conhecimento – o exato e o questionável.

À CAPES pelo apoio financeiro.



## RESUMO

A avaliabilidade de resíduos agrícolas para geração de bioenergia vem se destacar como interesse recente por parte do setor de agroenergia. Para essa finalidade, esse trabalho de dissertação realiza-se um estudo bibliográfico de caracterização de resíduos da casca do cacau, coco e café; para adequação às tecnologias de biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta. Avalia-se as possibilidades de rotas tecnológicas para a transformação do potencial energético inerente à composição dos resíduos de fruta em energia elétrica. O objetivo é direcionado à síntese estrutural de processos químicos pela representação do problema por meio de árvores de estado. A partir da combinação dos elementos de estudo envolvidos: resíduos frutíferos, tecnologias de beneficiamento da biomassa e tecnologias de conversão química; são propostas as possibilidades de rotas tecnológicas para composição dos ramos das árvores de estado. A etapa de otimização estrutural é direcionada à aplicação do método heurístico em relação ao problema de síntese. Dessa forma, é selecionada a rota tecnológica mais promissora de aproveitamento energético de cada resíduo. Como resultado, a biodigestão anaeróbia em reator do tipo batelada se mostrou a rota química mais promissora para o resíduo da casca de cacau. Para o resíduo da casca de coco, a rota química adequada foi a combustão direta, realizada em caldeira de grelha fixa; e para o resíduo da casca de café, a rota de conversão termoquímica do tipo pirólise precedida de peletização se mostrou mais promissora. Como contribuição, cabe destacar a possibilidade de valoração energética de resíduos frutíferos até então considerados inúteis para o setor energético. A representação do problema pela sistemática de árvores de estado e posterior resolução pela aplicação de regras heurísticas demonstra a originalidade do trabalho proposto.

*Palavras-chave:* Biodigestão anaeróbia, Combustão direta, Pirólise, Fluxogramas de Processo, Técnicas Heurísticas, Engenharia de processos.

## ABSTRACT

The availability of agricultural waste for bioenergy generation come to propose the recent interest by agroenergy sector. For this goal, this dissertation show a bibliografic study for waste characterization of cocoa bark, coconut bark and coffee bark in according to bioenergy technologies: anaerobic digestion, pyrolisys and direct combustion. Its made analysis of technology route possibilities for transform the energy potencial from fruit waste composition in electric energy. The objective its towards the structural synthesis of chemical process by problem representation with process state trees. From the combination of elements of study: fruit waste, biomass processing technology and chemical conversion technologies; its proposed the possibilities of technology routes for elaborate the branches of state trees. The step of structural optimization its based in applied the heuristics method towards the syntesys problem. Thus, its selected the most promised technology route of energetic use of each waste. As a result, the anaerobic digestion in batch reactor was the better option for cocoa bark. For a coconut bark, the chemistry route more adequated was the direct combustion, realized in boiled fixed grid; and for a coffee bark, the thermochemical pyrolysis conversion preceded by pelletization compactation showed more promised. As contribution from this work of dissertation stands out the possibility of energetic valorization of fruit waste untill then considered useless for energetic sector. The problem representation by systematic of state trees and after applied solution by heuristics rules show the originality from this proposed work.

*Key-words: Anaerobic Biodigestion, Direct Combustion, Pyrolysis, Process Flowcharts, Heuristic Approach, Process engineering.*

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 A problemática ambiental do descarte inadequado de resíduos agrícolas .....	1
1.2 Colocação do problema de estudo .....	2
1.3 Objetivos .....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Biomassa para a geração de energia .....	4
2.1.1 COCO ( <i>Coccus nucifera</i> L.) .....	7
2.1.2 CACAU ( <i>Theobroma Cacao</i> L.) .....	8
2.1.3 CAFÉ ( <i>Rubiaceae</i> , gênero <i>Coffea</i> ) .....	10
2.2 Tecnologias de tratamento de biomassa .....	11
2.2.1 Tecnologias de beneficiamento prévias à pirólise e combustão direta .....	14
2.2.2 Tecnologia de beneficiamento prévia à biodigestão anaeróbia .....	20
2.2.3 Pós-tratamento da biomassa: tecnologias de conversão química .....	21
3 METODOLOGIA .....	40
3.1 Fundamentos da Engenharia de Sistemas e Inteligência Artificial .....	40
3.2. Representação por Árvores de Estado de processos químicos .....	42
3.2.1 Premissas, hipóteses, limites e desafios para proposição das árvores de estado de processos .....	45
3.3. Técnicas Heurísticas aplicadas à elaboração de rotas químicas .....	47
3.3.1. Regra heurística para etapa de beneficiamento prévio .....	47
3.3.2. Regras heurísticas para escolha da via química – Biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta. ....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	56
4.1 Aproveitamento energético da casca do coco .....	57

4.1.1. Proposta de árvore de estado para a casca do coco.....	59
4.1.2. Multiplicidade de soluções para árvore de estado da casca do coco .....	61
4.1.3. Rota tecnológica promissora para a casca do coco.....	61
4.2. Aproveitamento energético da casca do cacau.....	63
4.2.1 Árvore de Estado – Casca do cacau.....	64
4.2.2. Multiplicidade de soluções para árvore de estado da casca do cacau .....	65
4.2.3. Rota química promissora – Casca do cacau.....	66
4.3. Aproveitamento energético da casca do café.....	67
4.3.1 Árvore de Estado – Casca do café.....	68
4.3.2. Multiplicidade de soluções para árvore de estado da casca do café.....	71
4.3.3. Rota tecnológica promissora para a casca do café .....	71
5 CONCLUSÕES .....	73
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76
APÊNDICE .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fotografia das partes fibrosas mostradas a partir da vista transversal da casca do coco. ....	8
Figura 2.2 – Fruto aberto do cacau (corte longitudinal), revelando as sementes e a casca espessa.....	9
Figura 2.3 – Casca do café .....	10
Figura 2.4 –Diagrama esquemático dos principais processos de conversão da biomassa em energia .....	13
Figura 2.5 – Etapas para transformação da matéria prima em briquetes ou péletes.	15
Figura 2.6 – Fotografias dos Briquetes de resíduo agrícola (a) e Pellets de resíduo agrícola (b). ....	19
Figura 2.7 – Diagrama principal da produção de péletes/briquetes de biomassa. ....	19
Figura 2.8 – Pré-tratamento químico em solução básica para biodigestão anaeróbia... ..	20
Figura 2.9 – Tecnologias aplicadas à transformação da biomassa em fontes de energia secundárias. ....	22
Figura 2.10 – Seqüência metabólica e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia .....	25
Figura 2.11 – Etapa I (fase de hidrólise e acidogênese) e etapa II (fase de acetogênese e metanogênese).....	26
Figura 2.12 – Razão de equivalência e diagrama ar-combustível para biomassa ....	29
Figura 2.13 – Etapas do processo de combustão .....	29
Figura 3.1 – O problema do projeto de processos representado por uma Árvore de Estados. (Rota tecnológica 1: via química da Biodigestão anaeróbia, rota	

tecnológica 2: via química da pirólise, rota tecnológica 3: via química da combustão direta).....	44
Figura 3.2 – Representação das regras heurísticas para a via de Biodigestão anaeróbia .....	49
Figura 3.3 – Representação das regras heurísticas para o beneficiamento da biomassa – Biomassa prévio à via termoquímica .....	52
Figura 3.4 – Representação das regras heurísticas aplicação da via termoquímica de conversão.....	53
Figura 3.5 – Síntese das etapas da metodologia em diagrama de blocos .....	55
Figura 4.1 – Árvore de Estado de Processo – Casca do coco .....	59
Figura 4.2 – Rota tecnológica promissora da casca do coco .....	61
Figura 4.3 – Árvore de Estado de Processo – Casca do cacau .....	64
Figura 4.4 – Rota tecnológica promissora da casca do cacau. ....	66
Figura 4.5 – Árvore de Estado de Processo – Casca do café .....	69
Figura 4.6 – Rota tecnológica promissora da casca do café .....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Características dos briquetes e péletes.....	18
Quadro 2.2 – Algumas vantagens e desvantagens da tecnologia de biodigestão anaeróbia para o aproveitamento energético de resíduos. ....	27
Quadro 2.3 – Algumas vantagens e desvantagens da tecnologia de pirólise para o aproveitamento energético de resíduos .....	34
Quadro 2.4 – Algumas vantagens e desvantagens da tecnologia de combustão direta para o aproveitamento energético de resíduos .....	38
Quadro 2.5 – Principais fenômenos associados às diferentes fases de combustão da biomassa.....	38
Quadro 4.1 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do coco.....	58
Quadro 4.2 – Diagrama Tecnologias químicas aplicadas à casca do cacau .....	63
Quadro 4.3 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do café.....	68

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Energia e potencial por tipo de biomassa



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A/C$	Razão ar-combustível	[ - ]
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de Cálcio	[ - ]
$CC_xH_y$	Hidrocarbonetos	[ - ]
$CH_4$	Gás Metano	[ - ]
$CO$	Monóxido de Carbono	[ - ]
$CO_2$	Dióxido de Carbono	[ - ]
CPHF	Composição química e mineral da farinha de casca de cacau	[ - ]
Fe	Ferro	[ - ]
$H_2$	Gás Hidrogênio	[ - ]
$H_2O$	Água	[ - ]
$H_2S$	Ácido Sulfídrico	[ - ]
K	Potássio	[ - ]
Mg	Magnésio	[ - ]
Na	Sódio	[ - ]
NaOH	Hidróxido de Sódio	[ - ]
$N-NH_4^+$	Amônio acoplado a nitrogênio	[ - ]

**Abreviaturas**

CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
CPHF	Composição química e mineral da farinha da casca dos frutos do cacau
Eq.	Equação
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais
UASB	Biorreator anaeróbico de manta e fluxo ascendente
PROINFA	Programa de Incentivo às fontes alternativas de energia
PRÓALCOOL	Programa de Incentivo à produção do etanol

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 A problemática ambiental do descarte inadequado de resíduos agrícolas

A utilização de biomassa proveniente de resíduos agrícolas vem se destacar como alternativa promissora num contexto de crise energética. Essa crise, por sua vez, vem ocorrendo devido à ineficiência da oferta de energia provenientes das principais fontes energéticas convencionais – petróleo e derivados; e sobretudo, devido à queda dos níveis dos reservatórios de água responsáveis pela geração de hidroeletricidade.

A escassez do petróleo assim como a crescente preocupação com a preservação ambiental, entre outros, são fatores que implicam na necessidade de desenvolvimento de pesquisas que propiciem um processo de transição planejado entre o uso do petróleo como uma das principais fontes energéticas mundiais, e o uso de fontes energéticas alternativas, em sua substituição (TORSO & MINUTTI, 2006).

O crescimento global da população tem impulsionado o aumento considerável do consumo de energia, além da extração de recursos naturais; com vistas a satisfazer a crescente necessidade de produção de insumos agrícolas para fins alimentícios. Dessa forma, a crescente escassez dos recursos naturais, a poluição local e global, além do desperdício de fontes naturais vem incentivar a questão ambiental do aproveitamento de resíduos, independente do tipo e origem. Esta, somente obteve maior atenção a partir da década de 1980. A constituição Federal de 1988, foi a primeira a abordar o assunto da política ambiental como tema relevante.

Embora a geração de energia destinada para fins industriais e residenciais, durante muitas décadas tenha se baseado em recursos de fontes não-renováveis; sucessivas crises como as crises do setor elétrico da década de 90, e o racionamento de energia no ano de 2001, tem-se o incentivo ao investimento em tecnologias de aproveitamento de recursos renováveis. Entretanto, distorções da administração pública, a nível municipal, estadual e federal vêm dificultar o incentivo

---

ao desenvolvimento de tecnologias de energias renováveis, devido à excessiva burocracia associada ao setor de inovação.

Esse contexto representa motivação para esse trabalho de dissertação. A disponibilização em grande quantidade de resíduos agrícolas do tipo casca de fruta do coco, cacau e café; no Estado do Espírito Santo justifica a escolha desses resíduos para o desenvolvimento dessa pesquisa, além deles serem altamente renováveis.

## **1.2 Colocação do problema de estudo**

A heterogeneidade da biomassa residual dificulta a seleção de técnicas de aproveitamento energético condizentes com o resíduo avaliado. Essa característica permite a adequação de múltiplas possibilidades de tecnologias químicas para o aproveitamento de um resíduo em específico. Neste trabalho de dissertação, além de se estudar a adequação das técnicas de Biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta, de forma individual para os três resíduos em estudo: casca do cacau, casca do coco e do café; há a avaliação da multiplicidade de possíveis tecnologias para o aproveitamento da casca do café, do coco e do cacau. Em vista de se ressaltar a relevância de uma tecnologia em relação à outra, perante a multiplicidade de soluções propostas, elabora-se a representação do problema de síntese de rotas químicas por meio das árvores de estado de processo químico. Posteriormente, adota-se o método de resolução por aplicação das técnicas heurísticas, para a otimização estrutural e consequente escolha da rota tecnológica mais promissora para cada árvore de estado.

## **1.3 Objetivos**

Destaca-se como objetivo a proposição de árvores de estado de processos para representação das possíveis rotas de aproveitamento energético para os resíduos da casca do cacau, coco e café. A partir disso, obter a rota tecnológica promissora

---

para cada árvore de estado, mediante a aplicação da técnica de otimização estrutural e tecnológica mediante aplicação do método indutivo da heurística.

Para se atingir este objetivo, ressalta-se os seguintes objetivos específicos:

- revisão bibliográfica da caracterização residual e tecnológica;
- proposição das árvores de estado de processos químicos;
- aplicação das regras heurísticas;
- escolha da estrutura otimizada de cada árvore de processos (rota tecnológica)

---

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Biomassa para a geração de energia**

A necessidade de se estabelecer racionalidade no uso de recursos energéticos vem se destacar como uma nova tendência. Após as crises do petróleo de 1973 e 1979, dois grandes eventos marcaram nova etapa do setor energético: a Conferência de Estocolmo e a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), ocorrida em 1992. A partir da década de 1990, a tendência ao desenvolvimento sustentável vem propor a necessidade de se diversificar a matriz energética. É nesse contexto que vem se desenvolver a geração de energia derivada dos subprodutos renováveis - resíduos das atividades agrícolas (CONSERVAÇÃO INTERNACIONAL - BRASIL, 2011).

A evolução gradual do cenário econômico brasileiro no setor de energia vem impor adequação das atividades agrícolas e agroindustriais em relação à necessidade de aprimoramento constante dos padrões de sustentabilidade ambiental. A problemática de disposição inadequada de resíduos agrícolas e agroindustriais em conjunto com questões de segurança energética, têm sido motivo de estudo de tecnologias na área de conhecimento de controle ambiental e da correspondente geração de bioenergia.

Os resíduos agrícolas quando dispostos de forma inadequada, representam perdas de biomassa e nutrientes de alto valor, além de proporcionarem doenças na própria lavoura. Grande parte da produção de resíduos agrícolas gerada é queimada. A biomassa residual de atividades agrícolas ainda é subutilizada, com exceção do bagaço de cana de açúcar.

Mais de 80% da fonte de biomassa usada para geração de energia é composta de resíduos florestais e arbustos. Na maioria das vezes, a biomassa residual agrícola é deixada para decomposição natural, sem aproveitamento da energia nela contida e

---

gerando passivos ambientais (DIAS, 2012). A etapa de colheita do fruto representa a principal fonte de geração de resíduos de diversas características e especificidades dependendo do tipo de cultura, seja por falha humana ou seja por falta de adequação da máquina à cultura em questão (OLIVEIRA, 2006).

A geração de energia a partir da biomassa pode se estabelecer de uma grande diversidade de matérias-primas. Estas podem se encontrar da seguinte forma: resíduos orgânicos provenientes de residências ou indústrias, excrementos de animais, lodo de estação de saneamento ambiental, grãos, palha dentre outros exemplos. Os agrocombustíveis, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos; são obtidos de qualquer tipo de matéria orgânica que contenha açúcar, amido ou material com teor de celulose (www.sebrae.com.br, 2014).

Conforme Saião, 2009 a classificação dos diferentes tipos de biocombustíveis pode ser da seguinte forma:

- biomassa sólida: proveniente de produtos e resíduos de agricultura (vegetais ou animais), além de resíduos florestais e das indústrias conexas; e sobretudo da fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos;
- biocombustíveis gasosos ou biogás: proveniente dos efluentes agro-pecuários, agroindustriais, e urbanos (lamas de estações de tratamento de efluentes domésticos) e ainda nos aterros de resíduos sólidos urbanos;
- biocombustíveis líquidos: originados de culturas energéticas, sendo o mais comum o biodiesel ou éter metílico, que pode ser obtido a partir de óleo de cozinha ou girassol. Além desse exemplo, cabe destacar o etanol, obtido da fermentação de hidratos de carbono (açúcar, amido e celulose).

A definição de resíduo se refere à matéria no estado sólido ou semi-sólido, líquido ou gasoso; que por sua vez possui valor econômico agregado, em vista da possibilidade de reaproveitamento, podendo até fazer parte novamente de um processo produtivo (DEMAJORVIC, 1995). De acordo com Farage (2009), os resíduos são um dos grandes desafios do Século XXI, pois há um crescente aumento na sua geração e, no entanto, não há soluções ambientais adequadas no que diz respeito à disposição final ou reaproveitamento. Sendo assim, a elevada

geração de resíduos, associada aos impactos ambientais causados pela disposição inadequada, demonstra um grande desperdício de matéria prima e energia. Nesse contexto cabe mencionar os resíduos derivados da biomassa orgânica.

O objetivo do trabalho é direcionado ao estudo dos resíduos agrícolas provenientes da casca de coco, de cacau e do café. No estado do Espírito Santo, conforme mostrado na Tabela 2.1, a quantidade de biomassa residual proveniente de lavoura permanente entre os anos de 2001 a 2010 foi de 854.202 toneladas, um valor menor do que a quantidade em toneladas de resíduos orgânicos provenientes das culturas de lavoura temporária, silviculturas, efluentes animais, efluentes domésticos e residenciais além de resíduos sólidos urbanos, conforme Aspe (2013).

Tabela 2.1: Energia e potencial por tipo de biomassa

Energia e Potencial por tipo de biomassa no ES (média 2001 a 2010)						
Tipo de biomassa	Quantidade produzida em [toneladas]	Energia por tipo de biomassa em [MWh]	Potencial por tipo de biomassa em [MW]	Energia por tipo de biomassa em Percentual	Potencial por tipo de biomassa em Percentual	
Lavoura Temporária	4.312.179	139.827	24,0	3,2%	4,4%	
Lavoura Permanente	854.202	110.941	13,1	2,6%	2,4%	
Silviculturas	1.851.203	755.922	90,8	17,4%	16,8%	
Efluentes Animais* (Cabeças)	17.604.726	3.104.371	373,0	71,5%	69,1%	
Efluentes Domésticos e Comerciais (Habitantes)	3.392.775	64.310	18,5	1,5%	3,4%	
Efluentes Domésticos e Comerciais (Habitantes)	3.392.775	168.237	20,2	3,9%	3,7%	
Resíduos Sólidos Urbanos (Habitantes)		4.343.608	539,7	100%	100%	

Fonte: Adaptado de IBGE, ano base 2000, *apud.*, ASPE, 2013.

Como motivação, tem-se que apesar da quantidade produzida em toneladas ser menor do que a quantidade de outros tipos de biomassa, além do menor potencial de geração de energia de resíduos da lavoura permanente, justifica-se então o desafio de incremento do potencial de geração de energia a partir dessa fonte de



---

biomassa. Essa proposta vem incentivar a originalidade desse projeto de pesquisa. Isso se dá pela avaliação da sistemática de síntese de processos químicos por meio de árvore de estado, segundo o qual serão avaliadas as possibilidades de rotas químicas estruturais para aproveitamento energético dos resíduos mencionados.

Os resíduos ligno-celulósicos agrícolas geralmente apresentam baixa densidade, elevado teor de água e diversidade de formas e granulometrias. Estas são limitações à etapa de pré-tratamento para posterior valorização energética. Há que se mencionar também que a biomassa é dispersa geograficamente, o que eleva o custo da coleta e transporte. Estes fatores representam empecilho ao projeto de uma agroindústria para o aproveitamento energético de resíduos agrícolas (QUIRINO, 2003).

### **2.1.1 COCO (*Coccus nucifera* L.)**

O coco (*Coccus nucifera* L.) sendo uma fruta de cultura de clima tropical, seu cultivo se desenvolve principalmente ao longo do litoral, sendo encontrado em áreas desde o estado do Pará até o estado do Espírito Santo. O coqueiro é uma planta de grande importância socioeconômica, que além de produzir água de coco, o albúmen sólido para indústria de alimentos e de óleos, gera uma grande quantidade de subprodutos e resíduos (EMBRAPA, 2006).

O processamento do coco é uma atividade geradora de resíduos. Após retirar-se o albúmen sólido de interesse para a obtenção de coco ralado e da água-de-coco, restam as partes fibrosas representadas pelo endosperma, mesocarpo e endocarpo, as quais constituem cerca de 45% dos componentes do fruto (FONTENELE, 2005). As partes fibrosas como mesocarpo e endocarpo podem ser visualizadas conforme a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Fotografia das partes fibrosas mostradas a partir da vista transversal da casca do coco.



Fonte: ROSA, *et al.*, 2002.

O mesocarpo de cocos maduros e secos fornece fibra lenhosa e dura. De acordo com Senhoras, 2003, trata-se de fibra multicelular que tem como principais componentes, a celulose e o lenho, de forma a conferir elevados índices de rigidez e dureza. Dentre as suas características cabe mencionar a resistência ao impacto, às bactérias e à água.

### **2.1.2 CACAU (*Theobroma Cacao* L.)**

O cacau é uma fruta de origem americana. Essa cultura começou a se desenvolver principalmente na Bahia, a partir de Ilhéus e se estendeu até o sul do recôncavo Baiano, chegando até o estado do Espírito Santo. Apresenta formato oval, de 20 a 30 cm de comprimento, e possui uma casca rígida que envolve as amêndoas (www.ceplac.gov.br, 2013). A Figura 2.2 destaca a vista transversal da casca do fruto cacau.

Figura 2.2 - Fruto aberto do cacau (corte longitudinal), revelando as sementes e a casca espessa.



Fonte: MASTER GARDENER LANDSCAPING OF FORT LAUDERDALE (2014).

A casca do cacau possui coloração vermelha ou amarela quando o fruto se encontra adequado para a colheita (www.ceplac.gov.br, 2013). Os testes de análise da composição mostram que o CPHF apresenta baixo teor de lipídios (1,5%) e elevados teores de cinzas (6,7%) e proteínas (8,6%), como descrito em estudos anteriores (AREGHEORE, 2002; DONKOH *et al.*, 1991, *apud.*, VRIESMANN, L.C., 2012). O principal resíduo da lavoura é a casca, que constitui aproximadamente 75 a 76% do fruto de cacau inteiro (DONKOH *et al.*, 1991) sendo que o teor de umidade médio verificado na casca é em torno de 12% (CARDOSO *et al.*, 2003).

Para cada tonelada de sementes secas, são geradas 10 toneladas de casca úmida do fruto, o que representa um sério problema ambiental. A disposição da casca na própria lavoura, favorece a proliferação intensa de inóculo de doenças, como a vassoura-de-bruxa, além de liberarem odores fétidos no local, devido à composição química da casca (BARAZARTE., *et al.*, 2008).

### 2.1.3 CAFÉ (*Rubiaceae*, gênero *Coffea*)

O Brasil é o maior produtor e exportador de café e o segundo maior consumidor após os Estados Unidos. Os fatores de ordem climática e edafológica do Espírito Santo propiciaram a expansão do café tipo *Conilon* como uma das alternativas de diversificação agrícola de grande relevância social e econômica (www.ceplac.gov.br, 2013). O aspecto visual das cascas de café após o beneficiamento podem ser visualizadas conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3 – Casca do café



Fonte: www.unicamp.br, 2014.

A casca do café é oriunda da limpeza do café em coco, composta de epicarpo (casca), mesocarpo (polpa ou mucilagem) e endocarpo (pergaminho). A polpa é o resíduo da despulpa úmida do café cereja, composta de epicarpo e parte do mesocarpo (MATIELLO, 1991). A casca é obtida seca e contém o pergaminho, e a polpa é úmida e não possui o pergaminho, pois este fica envolto no grão de café como forma de proteção (BARCELOS, *et al.*, 2013).

O beneficiamento tem por finalidade retirar a polpa seca do grão de café. Após a colheita, o fruto do café deve ser submetido a um conjunto de etapas tecnológicas para adequação dos grãos aos padrões de mercado. Pretende-se separar as sementes das partes envolventes (polpa, mucilagem, endocarpo ou pergaminho) e do seu próprio tegumento (película), assim como de impurezas e defeitos. De acordo

---

com Prado & Campos (2007), no processamento pós-colheita do café, desde a etapa de lavagem até seu beneficiamento, há considerável consumo energético, sendo a etapa de secagem uma das principais responsáveis pelo grande consumo energético.

O preparo do fruto por via úmida consiste na retirada da casca e/ou mucilagem do fruto maduro ou cereja, que são substratos propícios ao desenvolvimento de microorganismos, que podem favorecer fermentações prejudiciais à qualidade do produto final (MALTA, CHAGAS, OLIVEIRA, 2003, *apud.*, BAGGIO, J., 2006). A proporção de 1:1 entre o grão beneficiado e a casca de café durante o beneficiamento origina grande quantidade de casca de café (BADOCHA, COSTA, LEÔNIDAS, 2003).

Em função das diferentes condições edafoclimáticas e de diferentes espécies agrícolas de culturas permanentes, cada matéria-prima apresenta características distintas a depender do vegetal ou do resultado da mistura dos vários resíduos. Dessa forma, a etapa de pré-tratamento da biomassa residual em teste é de extrema importância para estabelecimento dos fundamentos técnicos relativos à coleta, etapa de secagem, moagem e classificação dos materiais, de modo a obter homogeneidade, qualidade e eficiência para posterior aplicação dos processos de conversão de biomassa.

## **2.2 Tecnologias de tratamento de biomassa**

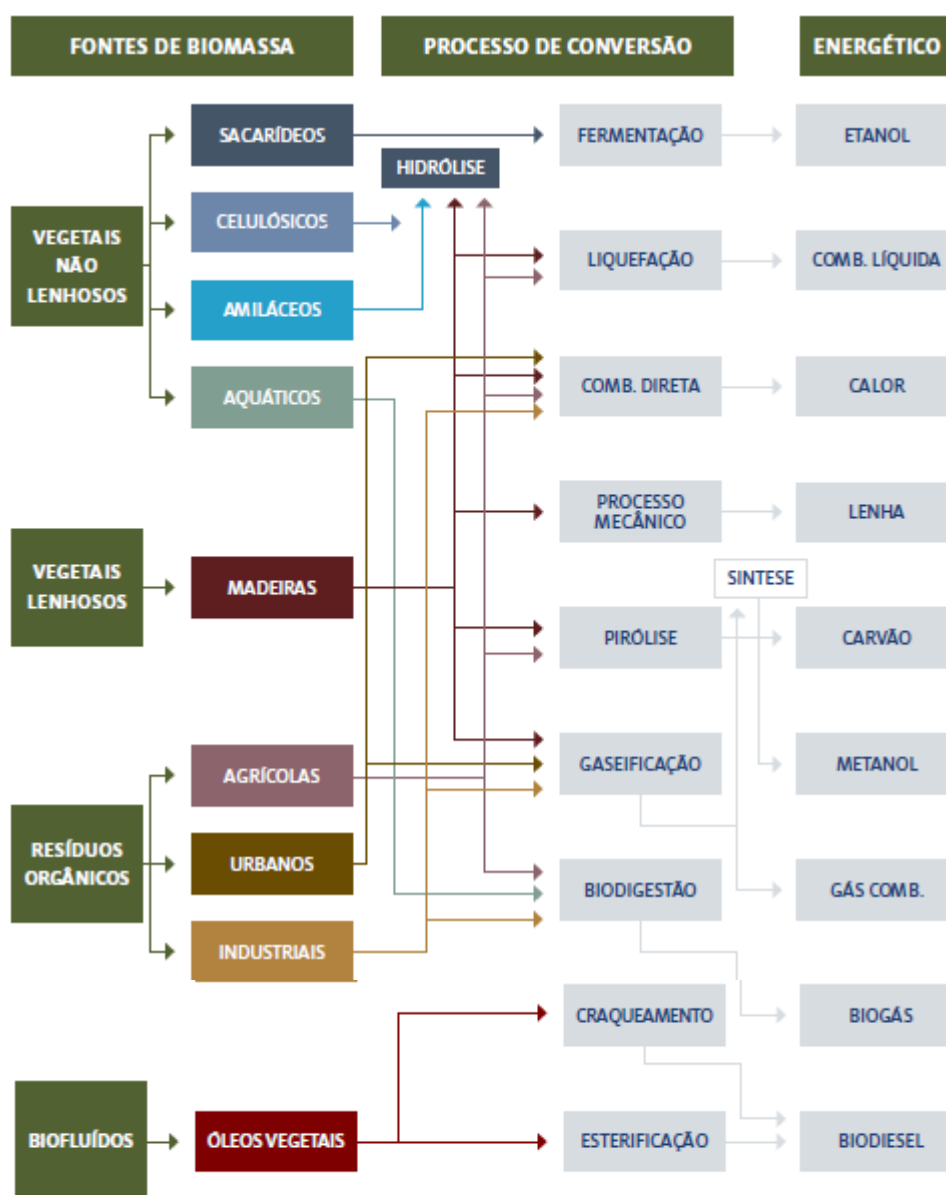
Para o aproveitamento energético, tem-se a classificação da biomassa da seguinte forma conforme Acioli, (1994):

- Sacarídeos (cana-de-acúcar, caule de sorgo, beterraba, dentre outros);
- Celulósicos (gramíneas, rejeitos florestais, bagaço de cana, casca de arroz, dentre outros);

- 
- Amiláceos (mandioca, milho, batata, dentre outros);
  - Triglicerídeos ou Oleaginosas (dendê, copaíba, amendoim, soja, algodão, mamona, dentre outros);
  - Aquáticas;
  - Madeiras;
  - Resíduos agropecuários, urbanos e agroindustriais.

Os principais processos de conversão energética da biomassa estão mencionados conforme a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Diagrama esquemático dos principais processos de conversão da biomassa em energia



Fonte – Balanço energético nacional – BEM. Brasília: MME, 1982, apud., ASPE, 2013.

No Brasil, a diversidade de condições edafoclimáticas, devido à característica tropical na maior parte dos estados da federação, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Além da produção de álcool, queima em fornos, caldeiras e outros usos não comerciais, a biomassa apresenta grande potencial no setor de geração de energia elétrica (ORSINI, 2012).

---

A revisão bibliográfica é direcionada para a caracterização das fontes de biomassa do tipo agrícola e/ou agroindustrial, dentre as apresentadas na Figura 2.4, com vistas a avaliar a aplicação das tecnologias: Pirólise (conversão do tipo termoquímica), combustão direta (conversão do tipo convencional) e biodigestão anaeróbia (conversão do tipo biológica).

As principais rotas tecnológicas de aproveitamento residual são os ramos das árvores de estado de processos químicos compostos das principais tecnologias de beneficiamento e de conversão química da biomassa. Dentre as principais tecnologias de beneficiamento abordadas cabe destacar: coleta, moagem, manuseio e classificação, secagem e compactação por peletização ou briquetagem. Dessas técnicas, o trabalho é focado nas tecnologias de secagem natural e forçada, além da tecnologia de compactação, por briquetagem ou peletização. Em seguida, a revisão bibliográfica é direcionada nas seguintes tecnologias de conversão química: Biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta.

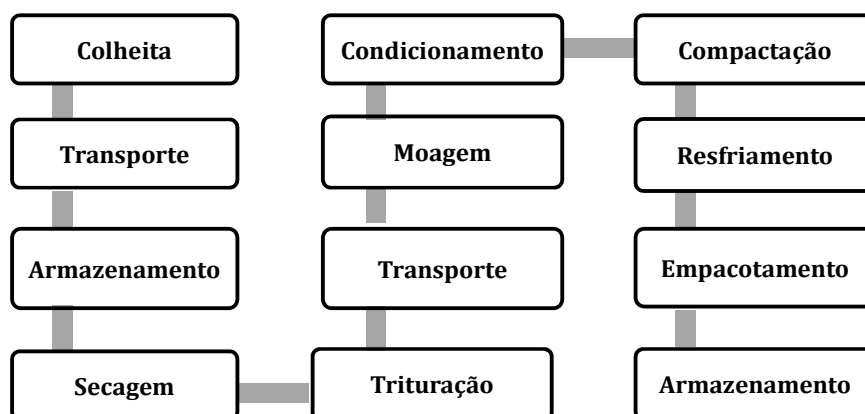
### **2.2.1 Tecnologias de beneficiamento prévias à pirólise e combustão direta**

Posteriormente à colheita, a biomassa residual é encaminhada para o armazenamento ou para o processamento que antecede a etapa de armazenamento – a depender de características específicas da composição residual em estudo. A etapa de estocagem, se necessária, pode ser crítica na etapa de pré-tratamento da biomassa para que em seguida seja aplicada técnica de aproveitamento da biomassa residual para geração de energia. Deve ser garantido que as características fundamentais da matéria-prima se mantenham constantes, em vista de se evitar a deterioração da biomassa. Além disso, é de suma importância evitar incorporação de materiais inorgânicos, como por exemplo, terra ou pedregulhos, pois são elementos desfavoráveis em qualquer processo de pré e pós-tratamento. A partir de então, por meio da composição real de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas, avalia-se o real potencial energético da biomassa para aplicação de determinada tecnologia, pirólise ou combustão direta (ROCHA, 2008). A aplicação



de tecnologias termoquímicas demandam etapa de compactação da biomassa do tipo briquetagem ou peletização, de forma que a etapa de secagem é essencial para incremento do poder calorífico do material residual. Dessa forma, as etapas pelas quais as matérias-primas podem passar desde a colheita dos insumos até a etapa de armazenamento dos briquetes ou *pellets* produzidos podem ser visualizadas conforme a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Etapas para transformação da matéria prima em briquetes ou péletes



Fonte: NILSON, et al., 2011 apud. DIAS, et al., 2012.

Cabe destacar que nem todas as etapas são necessárias para todas as matérias primas e o requisito de cada etapa será avaliado conforme o tipo de matéria- prima a ser compactado. Dessa forma a matéria-prima a ser compactada pode requerer um pré-tratamento antes de ser introduzida na prensa ou extrusora, como por exemplo a moagem, em vista de obter maior homogeneidade e/ou etapa de secagem, em vista de se obter biomassa residual com teor de umidade aceitável para as condições de armazenamento. Uma planta de briquetagem ou peletização pode estar equipada com trituradores, moinhos e secadores (DIAS, *et al.*, 2012). As principais tecnologias de beneficiamento estudadas nesse trabalho de dissertação são: secagem e compactação.

A etapa de secagem é um dos principais processos de beneficiamento da biomassa, em vista do alto teor de água do resíduo, após a etapa de colheita dos frutos e a retirada da polpa. Os resíduos do tipo casca de fruta, com baixo teor de fibras,

---

apresentam teor de umidade maior do que 50% (MALISIUS, 2000). O processo de secagem pode ser natural ou forçada. Na secagem natural ocorre o armazenamento da biomassa em ambiente aberto, num intervalo de tempo de dois a três meses para se reduzir o teor de umidade para um valor final em torno de 15 a 20% de umidade em base úmida, na escala de tempo de dias. Na etapa de secagem forçada, destaca-se a importância de um equipamento, que permite a redução do teor de água para o valor final desejado na escala de tempo de minutos ou horas (NOGUEIRA E LORA, 2003). Segundo Silveira, 2008, para a realização da técnica de compactação, recomenda-se para resíduo agrícola, a faixa de valores de teor de água entre 8 e 12%.

No que diz respeito à tecnologia de compactação, tem-se o seu uso devido às diferenças de características dos resíduos agrícolas. Como dessas diferenças, cabe destacar por exemplo: diferentes granulometrias, densidades energéticas e o alto teor de água; são aspectos que implicam na necessidade da etapa de compactação da matéria prima. Essa objetiva aumentar a densidade energética de forma a gerar mais energia em um menor volume de matéria-prima, além de facilitar o armazenamento e transporte desses materiais. Dentre as possíveis técnicas de compactação tem-se: enfardamento, briquetagem e peletização.

O enfardamento gera produto intermediário com maiores dimensões do que o produto final obtido, o fardo, quando comparado aos outros processos de compactação. São grandes e pesados, e devem ser desfeitos para seu uso. Podem ser alimentados integralmente em sistemas de alimentação adequados; e a partir disso consequente inserção em fornalha. A briquetagem gera produtos de alto poder calorífico devido à compactação dos resíduos de madeira como o pó de serragem e as cascas vegetais. O briquete apresenta formato regular e constituição homogênea. É considerado uma lenha ou carvão ecológico de alta qualidade, produzido pela compactação de resíduos ligno-celulósicos sob pressão e temperaturas elevadas (BIOMAX, 2009; BIOMACHINE, 2009). A peletização, por sua vez, gera produtos com capacidades energéticas similares aos briquetes, principalmente se os *pellets* forem comparados com briquetes pulverizados ou moídos. Diferem dos briquetes principalmente pela dimensão e forma do produto. Os pellets possuem diâmetro de 6 e 12 mm e comprimento de 4 a 5 vezes o diâmetro, enquanto os briquetes podem

---

ser de formato cilíndrico ou paralelepípedo. O formato cilíndrico normalmente apresenta diâmetro entre 80 e 90 mm e o formato paralelepípedo, normalmente apresenta as dimensões de 150x70x60 mm. (www.eubia.org, 2008, apud., SAIÃO, 2009). As diferenças marcantes no formato dos produtos briquetes e *pelletes*, são demonstradas conforme a Figura 2.6.

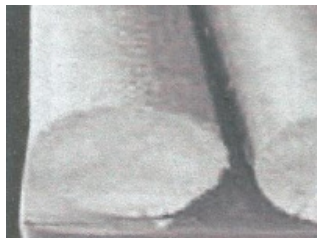
Cabe destacar que para poder ser compactada na forma de briquetes e pellets a biomassa deve possuir umidade variando na faixa de 8 a 12%; pois para valores superiores a compactação se mostra muito difícil e para valores inferiores o produto não se manterá compactado (SILVEIRA, 2008). Os biocombustíveis densificados são muito semelhantes em características como: poder calorífico, umidade e características químicas. As diferenças marcantes entre briquetes e pellets estão reunidas conforme o Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Características dos briquetes e pellets

Características	Pellets	Briquettes
Matéria prima	Madeira ou resíduos agrícolas triturados e secos	
Forma	Cilíndrica: Diâmetro de 6 e 12 mm e comprimento de 4 a 5 vezes o diâmetro	Cilíndrica: diâmetro entre 80 e 90 mm ou paralelepípedica – 150x70x60 mm.
Estrutura	Firme, robusta	Relativamente quebradiça, frágil.
Densidade	650 a 700 kg/m <sup>3</sup>	650 a 1200 kg/m <sup>3</sup>
Aspecto	Macio	Áspero
Transporte	Sacas	Unidades, peletes
Manuseamento	Uso manual ou automático	Utilização manual
Poder calorífico	16-17 MJ/kg	16-17 MJ/kg
Umidade	8 a 12% (SILVEIRA, 2008)	10 a 12% (SILVEIRA, 2008)
Cinzas	Máximo 0,5%	0,2%
Aspecto		

Fonte: Adaptado de SAIÃO, 2009, *apud.*, [www.eubia.org](http://www.eubia.org), 2013.

Figura 2.6 – Fotografias dos Briquetes de resíduo agrícola (a) e Pellets de resíduo agrícola (b).



(a)

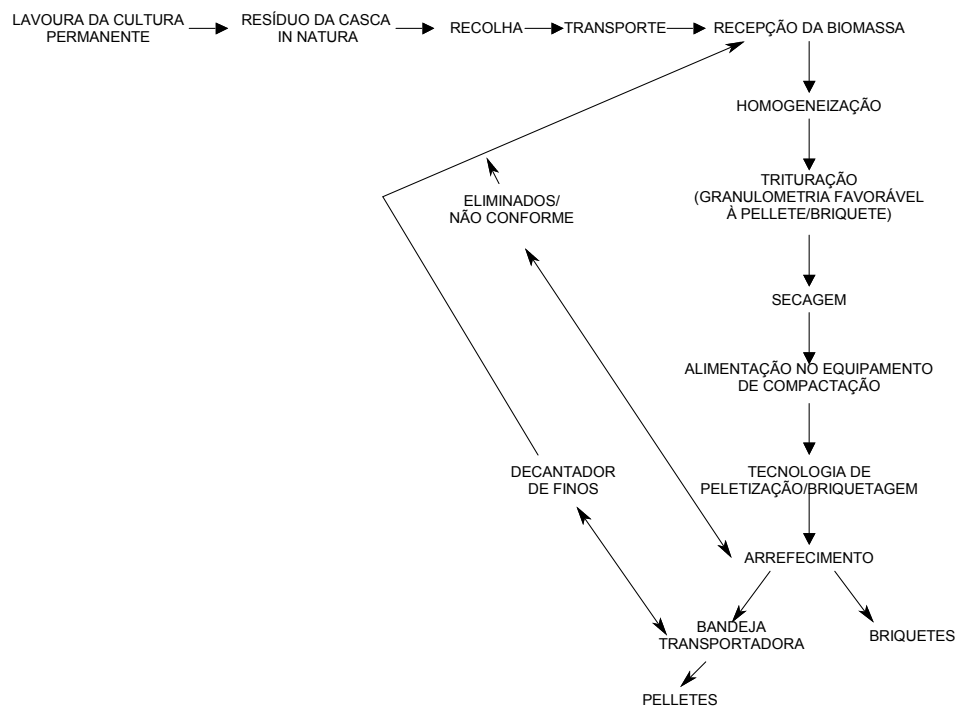


(b)

Fonte: [www.internationalrenewablesenergy.com](http://www.internationalrenewablesenergy.com), 2014.

Em síntese o beneficiamento da biomassa para posterior aplicação de uma das possíveis tecnologias de aproveitamento do tipo termoquímica e combustão direta, pode ser resumido conforme a Figura 2.7.

Figura 2.7 - Diagrama principal da produção de pellets/briquetes de biomassa.

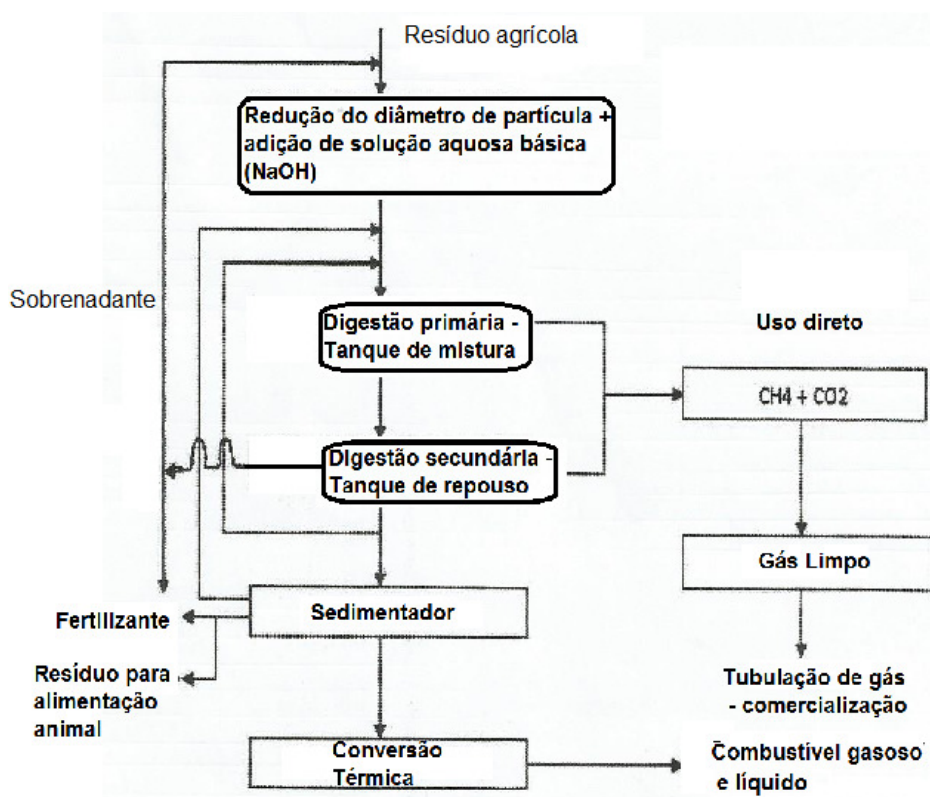


Fonte: Adaptado de Loução, 2008.

### 2.2.2 Tecnologia de beneficiamento prévia à biodigestão anaeróbia

Em se tratando da tecnologia de biodigestão anaeróbia, normalmente a matéria-prima residual depois de triturada, é destinada a um tanque de solução aquosa com consequente adição de solução básica (NaOH ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Este procedimento por sua vez, permite com que se forme uma solução tampão, para controlar o pH na etapa de acidogênese, nos tanques de digestão primária e secundária, conforme a representação esquemática da Figura 2.8. Dessa forma, a metanização será favorecida e portanto tem-se uma produção eficiente de biogás ao longo do processo químico (CHERNICHARO,1997).

Figura 2.8 – Pré-tratamento químico em solução básica para biodigestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de TOCK, *et al.*, 2010.

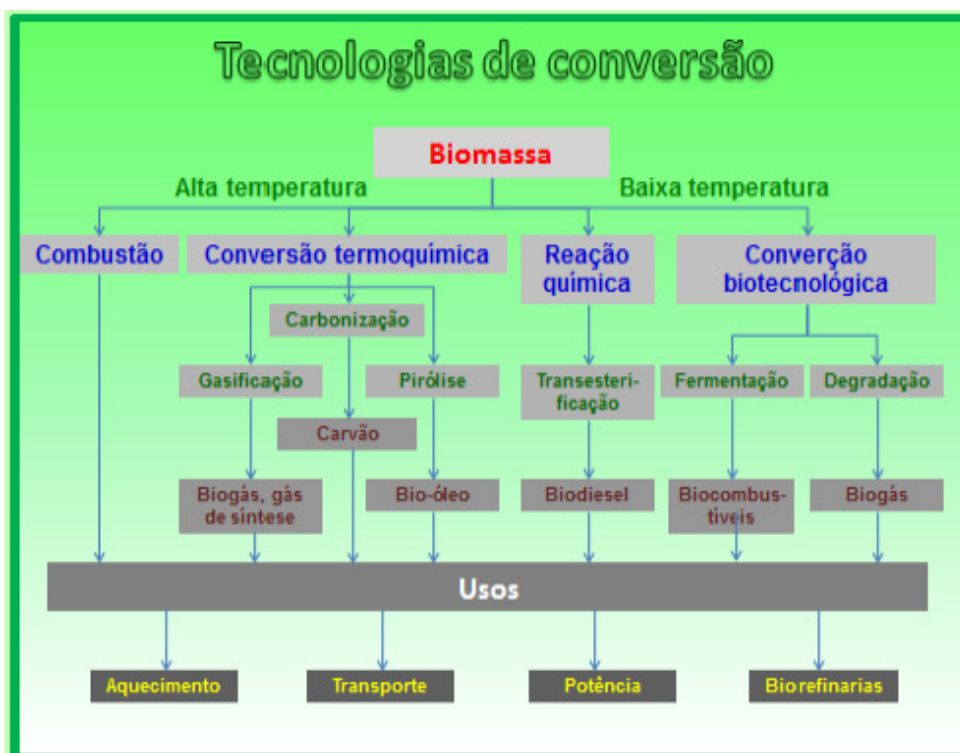
---

### 2.2.3 Pós-tratamento da biomassa: tecnologias de conversão química

A grande diversidade de tecnologias de conversão de biomassa, agrícola ou florestal, podem ser classificados segundo duas abordagens de métodos de conversão: termoquímicos ou biológicos. De acordo com Brás *et al.*, (2006) os métodos mais utilizados são os termoquímicos, que utilizam o calor como fonte de transformação. Esses processos têm se desenvolvido para o aproveitamento de biomassa residual a partir de atividades agrícolas e florestais e das indústrias de transformação agro-alimentar e da madeira. A adequação técnica do tipo de processamento e tecnologia de transformação que se deseja implantar em relação ao resíduo em estudo, depende das características da matéria-prima residual e do tipo de estado físico do biocombustível que se quer gerar: sólido, líquido ou gasoso, como fonte de energia secundária (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

Segundo Orsini, 2012 os principais tipos de tecnologias de conversão da biomassa para a geração de combustíveis como forma de energia secundária são: combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte ou quebra), processos biológicos (digestão anaeróbica e fermentação), ou processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação). Esses processos podem ser esquematizados conforme mostrado na Figura 2.9:

Figura 2.9 - Tecnologias aplicadas à transformação da biomassa em fontes de energia secundárias.



Fonte: 3º Congresso Internacional de Inovação, 17-18 de novembro 2010 FIERGS Rio Grande do Sul. *apud.*, ORSINI, 2012.

Nesse trabalho de dissertação, será realizada uma análise crítica para o aproveitamento de resíduos agrícolas para geração de energia, por meio das seguintes tecnologias atinentes à área de engenharia química: técnica de conversão biológica do tipo digestão anaeróbica precedida do pré-tratamento físico e químico, além da técnica de conversão termoquímica do tipo pirólise; e a técnica convencional do tipo combustão direta, precedidas do pré-tratamento de conversão física (secagem e compactação).

### 2.2.3.1. Processo de conversão biológico – Biodigestão anaeróbia

Entre os trabalhos encontrados na literatura que tratam da avaliação da potencialidade de geração de biogás por parte de resíduos agroindustriais,



---

destacam-se, tanto no âmbito internacional como no nacional, os realizados por Harwood, (1980), Sharma *et al.*, (1988), Viswanath, *et al.*, (1991), Pandey (2000), Bouallagui, *et al.*, (2005), Henrard, *et al.*, (2007), Prado & Campus (2008) e Tock, *et al.*, (2010).

Trata-se de um processo de conversão da matéria orgânica em metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além da formação de líquido e sólido residuais. A biomassa destinada a esse processo pode ser de origem florestal, orgânica ou resíduos sólidos urbanos. Normalmente é destinado a esse tipo de processamento químico, a matéria-prima que apresenta biodegradabilidade elevada por conta do baixo teor de fibras (CHERNICHARO, 1997). A formação de combustível gasoso proveniente da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos é atrativa economicamente, pois esse processo possibilita utilizar matéria-prima de alto teor de umidade e poder operar a temperatura e pressão ambiente. Entretanto, um dos grandes obstáculos refere-se à adequação da matéria prima para inserção no equipamento de processo, pois normalmente o resíduo apresenta granulometria heterogênea. O pré-tratamento físico inclui redução de tamanho de partícula e pré-incubação do material residual com água (SHARMA, *et al.*, 1988).

Batista, *et al.*, 2013 estudaram a potencialidade da casca do cacau para gerar biogás no sistema de reator batelada. Nesse sistema, percebe-se a influência do diâmetro de partícula na taxa de geração de biogás devido à fase metanogênica. Quanto menor o valor do diâmetro de partícula, maior a taxa de geração de biogás; com consequente necessidade de menor volume de controle reacional para obter-se um dado volume de biogás demandado.

Cabe ressaltar o estudo da biodigestão anaeróbica em reatores do tipo manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), além de sistemas de reatores em batelada para estudo da produção do biogás. No que diz respeito ao reator UASB, a avaliação da granulometria de partícula para estudo da biodigestão anaeróbia é de suma importância, conforme Chernicharo, 1997.

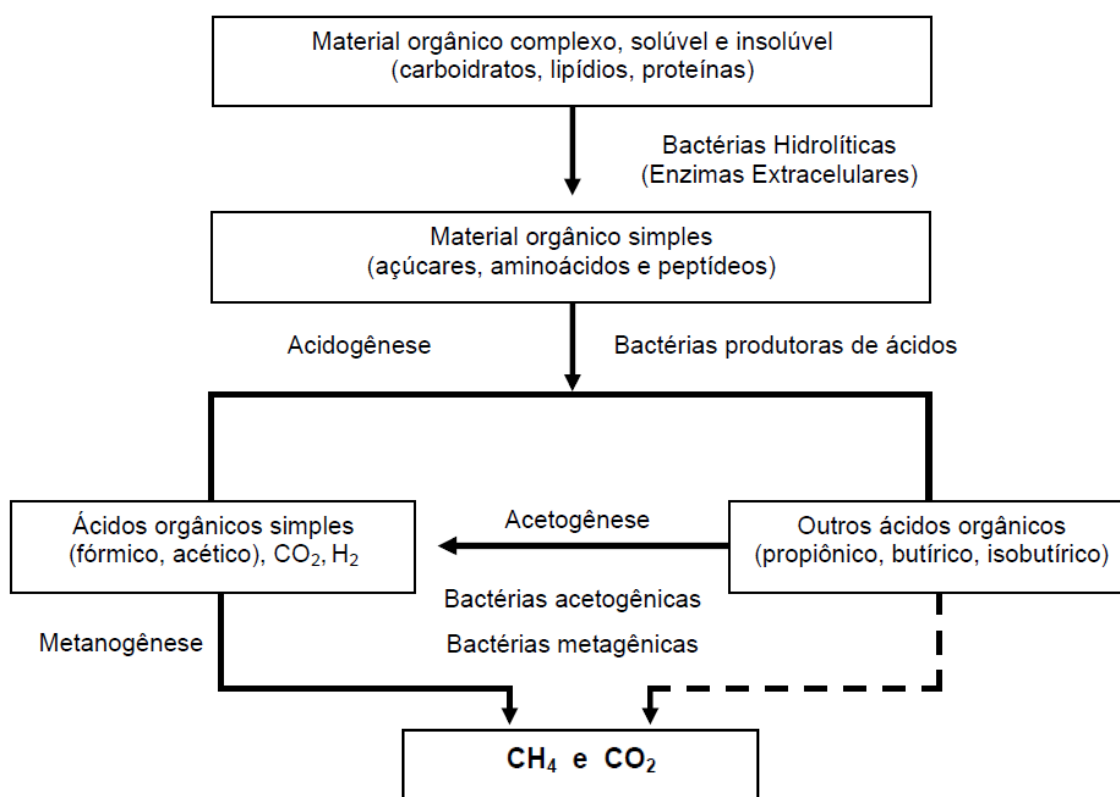
As células microbianas existem em uma variedade de formas, tamanhos e fases de crescimento, individualmente ou agregadas em várias microestruturas. Estas condições são importantes na digestão anaeróbia, pois é provável que a forma da biomassa tenha um efeito na sobrevivência do microrganismo e na transferência de

---

nutrientes, e, conseqüentemente, na eficiência da digestão anaeróbia. Ou seja, destaca-se a importância da geometria favorável de interação entre particulado de biomassa e células microbianas. Estas, por sua vez, se aderem ao particulado residual. Sendo o particulado residual com dimensões próximas entre si, tem-se a formação de agregado microbiano denso, denominado grânulo, o que é importante para a performance do reator UASB (CHERNICHARO, 1997).

Biodegradabilidade e digestibilidade podem ser aprimoradas por uma etapa de pré-tratamento mecânico, químico, e térmico. A etapa de hidrólise de ligações lignocelulósicas é dependente da relação da quantidade de lignina para a de celulose. Cabe mencionar que, apesar da baixa digestibilidade e degradabilidade, o efeito do tamanho de partícula como etapa de pré-tratamento do resíduo orgânico, pode tornar vantajosa a taxa de produção de gás devido ao aumento relativo da superfície de contato com o meio líquido. Além disso, pode contribuir também para um menor volume de controle do digestor necessário para atender à demanda da produção de biogás (SHARMA, *et al.*, 1988). Nestes trabalhos dos autores citados, diversos resíduos dentre os quais aguapé, casca do cacau, casca de arroz, cevada, espécies de pistia, serragem de louro, casca de banana, palha de café, manga, abacaxi, tomate, jaca, banana, laranja e microalga foram avaliados para o estudo de potencialidade para geração de biogás de forma eficiente, em conjunto com condições físicas apropriadas. A representação das etapas da fermentação anaeróbia de um modo geral se dá de acordo com a sequência metabólica e grupos microbianos envolvidos nas etapas de produção do biogás, apresentados na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Seqüência metabólica e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia

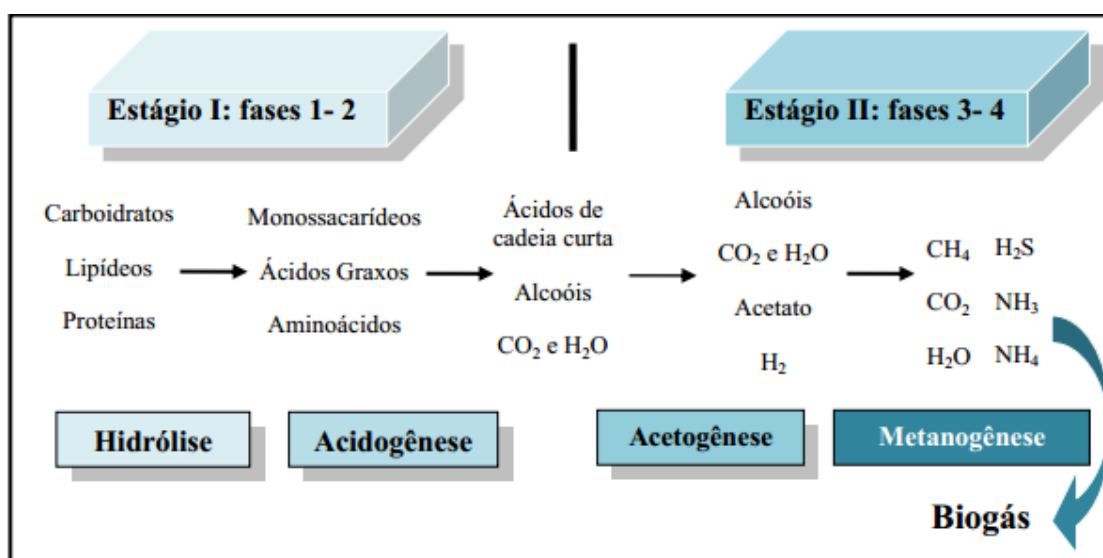


Fonte: CHERNICHARO (1997).

Na etapa de hidrólise, os materiais particulados complexos (polímeros) são hidrolisados em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores). A hidrólise dos polímeros geralmente ocorre de forma lenta, sendo esta um dos grandes empecilhos à otimização dessa tecnologia. Vários fatores podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado: a temperatura do reator; o tempo de residência do substrato no reator; a composição do substrato (ex.: teores de lenhina, hidratos de carbono, proteínas e lipídios); o tamanho das partículas; o pH do meio; a concentração de  $\text{N-NH}_4^+$  e a concentração de produtos da hidrólise (ex.: ácidos graxos voláteis) (RUSSO, 2005). Esses produtos intermediários solúveis gerados, em seguida, são submetidos à fase de acidogênese. Essa etapa é efetuada por um grande grupo de bactérias fermentativas, especificamente as espécies *Clostridium* e *Bacteroids*. Os compostos solúveis são metabolizados no interior dessas células fermentativas, de modo a formar compostos mais simples, dentre os quais cabe mencionar: ácidos orgânicos, álcoois, amoníaco, dióxido de carbono e hidrogênio, para além de novas células bacterianas (RUSSO, 2005). Em seguida, na etapa de

acetogênese, ocorre a oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica, obtendo-se substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são: hidrogênio, dióxido de carbono e ácido etanoico. Durante a formação dos ácidos acético e propiônico, é formada uma grande quantidade de hidrogênio, fazendo com que o valor do pH do meio se acidifique. O hidrogênio e o acetato podem ser metabolizados diretamente por parte das bactérias metanogênicas. No entanto, grande parte dos produtos da acidogênese, devem ser metabolizados nessa etapa para gerar propionato e butirato, que em seguida, são decompostos em hidrogênio, acetato e dióxido de carbono pelas bactérias acetogênicas (RUSSO, 2005). Na quarta etapa, metanogênese, o hidrogênio, ácido acético, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e o monóxido de carbono são metabolizados pelas bactérias metanogênicas para formar metano e dióxido de carbono (RUSSO, 2005). Resumidamente, tem-se os principais produtos intermediários e finais das 4 etapas durante o processo de biodigestão anaeróbia, conforme a Figura 2.11. Durante o processo de produção, necessariamente, as reações químicas ocorrem de forma sinérgica, sendo que as fases 1-2 e 3-4 possuem uma relação de dependência, logo as mesmas são organizadas em dois estágios (I e II), em que os níveis de degradação devem ter o mesmo tamanho (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Figura 2.11 - (fase de hidrólise e acidogênese) e etapa II. (fase de acetogênese e metanogênese)



. Fonte: DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008.

Durante o metabolismo de microrganismos metanogênicos em compostos ricos de proteína, através da reação de hidrólise, proporciona a formação de  $\text{N-NH}_4^+$  no reator, que por sua vez, pode levar à formação de bicarbonato de amônia. Esse pode atuar como fonte de nitrogênio e também como solução tampão para a massa de resíduos sólidos orgânicos durante o processo de bioestabilização (FELIZOLA ., *et al*, 2006).

A composição do biogás, produzido a partir de resíduos de origem agroindustrial ou florestal, é em torno de: 60% de metano e 40% de  $\text{CO}_2$ , com pouca variação de cultura para cultura (HARWOOD, 1980). Em relação às quatro etapas, tem-se que a produção de biogás, por meio de material vegetal sólido, pode ser subdividida em dois estágios: a atuação microbiológica em materiais insolúveis (principalmente celulose) e posteriormente, a formação de biogás, através dos produtos solúveis liberados devido à esta atuação. A depender do tipo de resíduo, uma das duas etapas citadas pode ser a etapa que limita a velocidade de produção do biogás (HARWOOD,1980). O Quadro 2.2 lista algumas vantagens e desvantagens da aplicação da tecnologia de biodigestão anaeróbia.

Quadro 2.2 - Algumas vantagens e desvantagens da tecnologia de biodigestão anaeróbia para o aproveitamento energético de resíduos

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Biodigestão anaeróbia	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Desvinculação da produção de eletricidade;</li> <li>— Menor emissão de poluentes atmosféricos;</li> <li>— Produção de biofertilizantes associado à geração de biogás.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Heterogeneidade dos resíduos: dificulta o controle de variáveis operacionais;</li> <li>— Tecnologia não consolidada para resíduos agrícolas em escala comercial;</li> <li>— Efeito do problema da corrosão nas partes metálicas internas do equipamento.</li> </ul>

Fonte: Autoria própria, 2013

Entre os diversos tipos de aplicação que têm sido feito para a referida tecnologia, cabe destacar a aplicação em tratamento de águas residuárias, aterros sanitários monitorados, valorização de resíduos orgânicos usualmente desperdiçados e tratamento de efluentes industriais.

---

### 2.2.3.2 Processos de conversão da biomassa à alta temperatura: pirólise e combustão direta

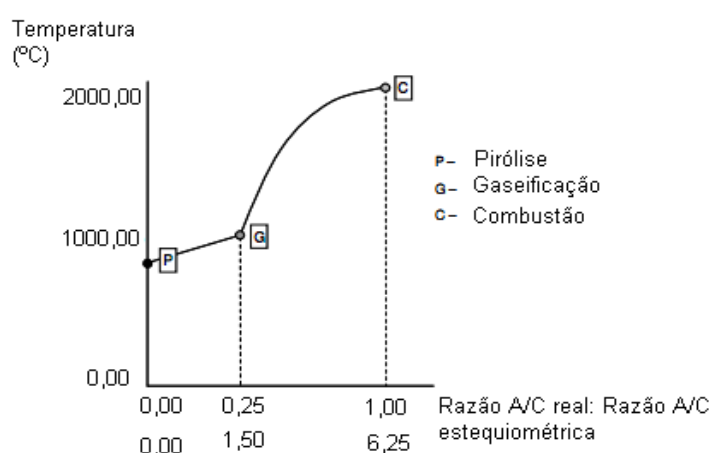
Os processos de conversão à alta temperatura se subdividem em dois grandes grupos conforme o fluxograma da Figura 2.8: combustão direta e conversão termoquímica. O processo de conversão termoquímica, por sua vez, se subdivide em carbonização, pirólise e gaseificação. A principal distinção entre os dois grandes grupos se refere a quantidade de oxigênio presente no momento da transformação. O processo de combustão não apresenta controle da taxa de fornecimento de oxigênio (ou ar comburente propriamente dito). Na conversão termoquímica, é de suma importância o controle do fornecimento de oxigênio, devido a prioridade da degradação térmica da biomassa, em vista de se obter produtos do tipo bio-óleo, gases e resíduo sólido do tipo carvão (ORSINI, 2012). Os processos de transformação termoquímicos – pirólise e gaseificação; além da tecnologia de combustão direta - representam mais de 95% da valorização energética de biomassas (DEMIRBAS, 2005, *apud.*, VIRMOND, E., 2007). Segundo Reed e Desesrosiers, (1979), *apud.*, Virmond, 2007 os diferentes teores de oxigênio presentes no processo de conversão da biomassa, para a ocorrência de diferentes processos termoquímicos, se dá em termos de estequiometria. Esses processos diferenciam-se pela relação ar-combustível (A/C) e pela faixa de temperatura.

A Figura 2.12 demonstra o diagrama, de forma que as temperaturas de equilíbrio para as reações de conversão da biomassa são dadas em função da razão de equivalência: razão ar-combustível real/ razão ar-combustível estequiométrica:

O comportamento do gráfico da figura 2.12 é justificado por aspectos técnicos inerentes às diferentes fases da combustão: pirólise, gaseificação e a combustão direta. Na etapa de pirólise, processo de degradação térmica em ausência de combustível, tem-se a razão de equivalência nula, num valor de temperatura de equilíbrio de aproximadamente 1000°C. A gaseificação por sua vez, caracteriza a degradação térmica da matéria orgânica por meio de taxa de fornecimento de combustível constante e controlada, de forma que a razão de equivalência nesse

caso é um valor maior do que zero, num valor de temperatura de equilíbrio maior do que  $1000^{\circ}\text{C}$ . Na última fase, combustão direta propriamente dita, segundo a qual não há controle da taxa de fornecimento de combustível, a razão de equivalência se mostra um valor maior do que a razão de equivalência para a gaseificação, num valor de temperatura de equilíbrio também maior, ou seja, em torno de  $2000^{\circ}\text{C}$ .

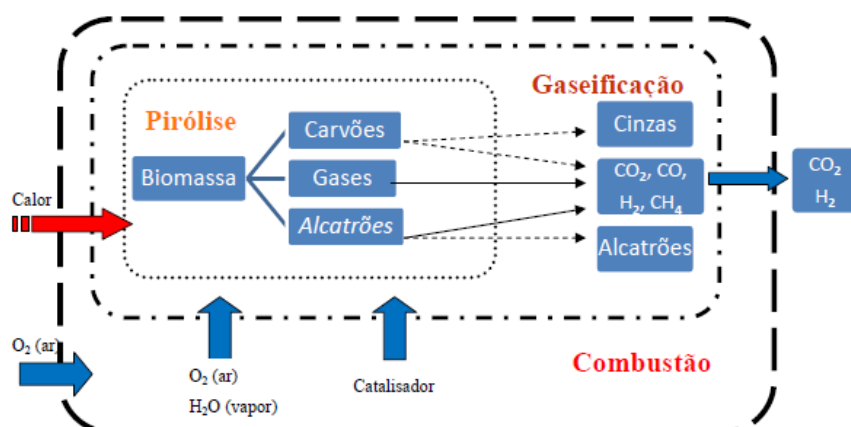
Figura 2.12 - Razão de equivalência e diagrama ar-combustível para biomassa.



Fonte: Reed e Desesrosiers, 1979, *apud.*, VIRMONT, E., 2007.

A partir das características dos três principais fenômenos envolvidos na combustão, vale mencionar que a combustão engloba as fases pirólise e gaseificação. De forma esquemática, tem-se a representação simplificada de como as fases estão interligadas entre si, mediante a Figura 2.13.

Figura 2.13 – Etapas do processo de combustão



Fonte: SOUSA, 2009.

---

### 2.2.3.2. Processo de conversão termoquímico da biomassa – pirólise

No que diz respeito à pirólise, entre os trabalhos encontrados na literatura que tratam da avaliação da viabilidade técnica e econômica dessa tecnologia a partir de resíduos agrícolas, destacam-se, tanto no âmbito internacional como no nacional, os realizados por Andrade *et al.*, 2004; Tienne, *et al.*, 2004, Wannapeera, *et al.*, 2008 e Kiruthika, *et al.*, 2013 dentre outros.

O processo de pirólise trata da decomposição térmica da matéria orgânica em ausência de oxigênio cuja injeção de calor se dá por fonte térmica externa. Os produtos principais são: mistura gasosa hidrocarbônica rica, um líquido oleoso e carvão vegetal. Entre os compostos orgânicos que prevalecem na pirólise da biomassa cabe ressaltar: fração gasosa contendo CO, CO<sub>2</sub>, alguns hidrocarbonetos e H<sub>2</sub>; fração condensável contendo água e compostos orgânicos de baixo peso molecular (aldeídos, cetonas, ácidos e alcoóis) e fração sólida contendo resíduos de polissacarídeos de maior peso molecular, derivados do furano, compostos fenólicos e partículas do resíduo sólido em suspensão e compostos formadores de fumaça (VIRMOND, 2007). A energia para a manutenção do processo pode ser proveniente da queima de gases e de voláteis.

Nestes trabalhos, diversos resíduos dentre os quais .a casca do coco-da-baia, casca e bagaço da laranja, aparas de madeira, palha de milho, casca de amendoim, casca de árvore, casca de milho, casca de arroz, dentre outros, foram avaliados para o estudo de potencial energético do material constituinte da casca por meio da pirólise em conjunto com condições físicas apropriadas.

Andrade *et al.*, 2004 objetivaram estudar a pirólise do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e efetuar a análise química imediata do carvão vegetal produzido. O coco inteiro e seu endocarpo (verde e maduro) foram submetidos à pirólise sob as temperaturas máximas de destilação de 350, 450 e 550°C. Foi adotado como referência o carvão derivado do lenho de eucalipto (*Eucalyptos urophylla* S.T. Blake). Os maiores rendimentos obtidos em gases condensáveis foram provenientes da pirólise do endocarpo verde, em todas as temperaturas analisadas e da



---

destilação do lenho de eucalipto a 550 °C. Esse rendimento foi calculado subtraindo-se de 100% o somatório dos rendimentos gravimétricos em carvão e em gases condensáveis. Esse cálculo do rendimento de gases condensáveis e incondensáveis está estreitamente relacionado aos rendimentos gravimétricos em carvão. Os maiores teores de carbono fixo foram obtidos dos carvões derivados do endocarpo do coco maduro, pirolisados nas temperaturas máximas de 450 e 550 °C. Um maior rendimento em carvão resultará em menor rendimento em gases condensáveis, incondensáveis ou ambos (ANDRADE, 1989; 1993, apud., ANDRADE, *et al.*, 2004). Concluiu-se desse estudo que os rendimentos médios de gases condensáveis se mantiveram dentro dos patamares aceitáveis do ponto de vista técnico-científico (PEREIRA, *et al.*, 2000, apud., ANDRADE, *et al.*, 2004). Essas oscilações foram decorrentes principalmente ao aumento gradativo da temperatura máxima de destilação e as oscilações nos rendimentos gravimétricos em carvão do material lignocelulósico. A temperatura máxima de destilação foi o principal parâmetro responsável pelos valores de rendimento e teores médios de matéria volátil dos carvões.

Tienne, *et al.*, 2004, objetivaram em seu trabalho estudar a pirólise da casca de laranja para analisar a viabilidade de se produzir carvão e subprodutos da casca e da casca com o bagaço da laranja (*Citrus Sinensis*), além da análise química imediata do carvão vegetal da casca da laranja, com e sem bagaço. A temperatura de realização da pirólise dos resíduos da casca de laranja e da lenha de eucalipto foi em torno de 450 °C. Os rendimentos médios em gases condensáveis se equiparam àqueles apresentados pela madeira de eucalipto (*E.glandis*), todos em patamares acima de 40,00%. Os rendimentos médios em gases não-condensáveis dos resíduos da laranja superaram o valor médio apresentado pela lenha de eucalipto em cerca de 7%. A análise química dos carvões gerados forneceram dados de teores de voláteis menores que os valores da lenha de eucalipto, teores de cinza nove vezes maiores e teores de carbono cerca de 5,0% menores. Os rendimentos médios em carbono fixo dos resíduos da laranja foram de cerca de 6,4% menores que o valor médio apresentado pela lenha do eucalipto. Com esse estudo verificou-se viabilidade na transformação dos resíduos da laranja em carvão e nos subprodutos da pirólise.

---

Wannapeera, *et al.*, 2008 estudaram a técnica de pirólise rápida da casca do arroz, palha do arroz e caroço de milho, resíduos de grande abundância na Tailândia. As condições de pirólise foram investigadas num reator do tipo leito fixo cujas condições operacionais foram simuladas como se o processo químico se desse num gaseificador comercial do tipo leito fluidizado. Os efeitos da temperatura de pirólise e o intervalo de tempo para a ocorrência das taxas de degradação térmica para a formação dos produtos gasosos e do carvão vegetal foram investigadas. As amostras de biomassa foram submetidas a testes de altas taxas de transferência de calor, superiores a 1000 °C/s. Os tempos de residência foram avaliados na faixa de 1 a 10,800 segundos. A temperatura média obtida pelas amostras foi de 850 °C. A alta taxa de perda de massa sofrida pelas três amostras de biomassa foi afetada pela proporção entre os componentes químicos constituintes dos respectivos resíduos bem como o conteúdo de espécies metálicas. A amostra de caroço de milho, que continha baixo conteúdo de lignina e alto teor de celulose, apresentou a maior taxa de perda de massa durante os experimentos.

A casca do arroz, por sua vez, em função de conter alto teor de lignina apresentou a menor taxa de degradação térmica. O teor de metais (Na, K, Ca e Mg) demonstrou relação com o rendimento de desvolatilização conforme o teor na biomassa. A influência da presença dos metais foi mais relevante na palha de arroz, em vista desse resíduo ter apresentado maior teor de metais. Ainda que Bridgwater *et al.* (2003) *apud.*, Wannapeera, *et al.*, (2008) tenha sugerido que a presença de metais em conjunto com os constituintes da biomassa, seja favorável no que tange a desempenhar papel de catalizadores da degradação térmica, não há uma correlação definida entre o conteúdo de espécies metálicas e evolução do comportamento da produção de gás. Os perfis de produtos gasosos formados foram praticamente os mesmos para as três amostras de resíduos, com a predominância do teor de monóxido de carbono (CO) como principal constituinte. O caroço de milho, que contém o maior teor de celulose, forneceu o maior rendimento de gás produzido.

Kiruthika, *et al.*, 2013 estudou os principais parâmetros relacionados a otimização da eficiência da tecnologia de pirólise. A adequação dos vários tipos de substratos agrícolas teve como premissa densidade de biomassa a granel de 95 – 125 kg/m<sup>3</sup> e

---

conteúdo de umidade na faixa de 4 – 12 % para várias matérias-primas. Dentre as propriedades químicas mais importantes cabe mencionar: teor de matéria volátil (65 – 85%) e teor de carbono fixo (15 – 22%). As temperaturas de teste foram de: 450, 475, 500, 525 e 550 °C. Conforme os experimentos, verificou-se também variações na proporção entre líquido (bio-óleo) e carvão produzidos a depender da temperatura de operação. Por exemplo, o aumento da temperatura para valores superiores a 550 °C, faz com que o predomínio de produto seja em relação ao bio-óleo. Acerca dos resíduos estudados, principalmente dos provenientes de culturas de grãos, concluiu-se a tendência de que quanto maior o teor de sólidos voláteis e de carbono fixo, maior a percentagem de bio-óleo produzida.

O rendimento na produção de líquido depende do tipo de biomassa, temperatura, tempo de residência do vapor superaquecido, a separação de produtos carbonizados, e do conteúdo de cinzas da biomassa. Esses dois últimos aspectos mencionados que interferem no rendimento de produção do líquido apresentam efeito catalítico no *cracking* de vapor (BRIDGWATER, 2011).

A qualidade da etapa de pré-tratamento da biomassa a ser inserida no reator está relacionada à realização da etapa de secagem como garantia do teor de água menor do que 10% em base úmida de forma a minimizar a umidade no produto líquido obtido. Além disso, vale destacar também a importância de um tamanho de partícula que permita a elevada taxa reacional e em seguida a rápida separação do material carbonizado formado como subproduto, de modo a evitar a degradação do bio-óleo formado. Mais de cem tipos de biomassa tem sido testados, além de resíduos de madeira propriamente ditos, dentre os quais menciona-se: palha, caroço de azeitona, cascas de nozes, resíduos florestais como cascas frutíferas e resíduos sólidos urbanos como lodo de esgoto (BRIDGWATER, 2011).

A proporção relativa das fases sólida, líquida e gasosa varia em função da temperatura (geralmente opera-se entre 400 e 900 °C), do processo, da composição da biomassa e do tipo de equipamento empregado.

Os gases não condensáveis podem ser utilizados para a produção de vapor através de trocadores de calor e caldeiras ou, após resfriamento e limpeza em sistema de controle de emissão. Ainda destaca-se sua utilização para geração de eletricidade

ou são destinados à fabricação de produtos químicos por meio da queima desses gases em caldeiras, turbinas a gás ou motores de combustão interna (FEAM, 2012). O líquido pirolenhoso é corrosivo, nocivo e altamente poluente. Assim, esse líquido pode ser gaseificado ou refinado para uso energético (CAMPOS, 2007, apud., FEAM, 2012). O balanço energético é sempre positivo, pois sempre produz mais energia do que consome (FEAM, 2012). Acerca dos fundamentos teóricos da técnica de pirólise expostos, resume-se as principais vantagens e desvantagens da tecnologia de pirólise para o aproveitamento energético de resíduos conforme mostrado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Algumas vantagens e desvantagens da tecnologia de pirólise para o aproveitamento energético de resíduos

<b>Tecnologia</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desvinculação da produção de eletricidade;</li> <li>- Menor emissão de poluentes atmosféricos;</li> <li>- Redução do volume de resíduos a ser disposto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heterogeneidade dos resíduos: dificulta o controle de variáveis operacionais;</li> <li>- Tecnologia não consolidada em escala comercial;</li> <li>- Elevado custo operacional e de manutenção</li> </ul>

Fonte: Adaptado de FEAM, 2012.

Dentre as diferentes aplicações dos produtos obtidos, cabe destacar a geração de calor e energia (FEAM, 2012). Além disso, compostos químicos de alto valor agregado podem ser extraídos, como adesivos e conservantes para madeira, corantes e flavorizantes para alimentos.

### **2.2.3.3. Processo de conversão químico convencional – combustão direta**

No que diz respeito à combustão direta, entre os trabalhos encontrados na literatura que tratam a avaliação da viabilidade técnica e econômica dessa tecnologia a partir de resíduos agrícolas, destacam-se, tanto no âmbito internacional como no nacional, os realizados por Melo, *et al.*, 2005; Haykiri-Acma & Yaman, 2011 e Kok & Ozgur, 2013. Trata-se do processo mais antigo de utilização da biomassa. É responsável por mais de 97% da produção mundial de bioenergia (VIRMOND, 2007).

A queima da biomassa representa o processo dendroenergético mais disseminado. Pode ser realizado nos mais variados tipos de equipamentos como fogões, fornos e

---

caldeiras. É aplicado à diversas finalidades como cocção doméstica, setor de serviços como restaurantes e também para produção de vapor no setor industrial, higienização, aquecimento ou produção de eletricidade em equipamentos do tipo turbina. Acredita-se que é prática e de baixo custo, por não demandar equipamentos de processo de alto aperfeiçoamento tecnológico, o processo de combustão normalmente é muito ineficiente (CORTEZ, 2011).

O tipo de matéria prima destinada à combustão pode ser líquida ou gasosa. Na combustão da matéria-prima sólida, tem-se a distinção em 4 etapas distintas: Aquecimento e secagem, pirólise, oxidação e pós-combustão. Essas etapas podem acontecer simultaneamente em diferentes regiões da biomassa no processo de combustão (RENDEIRO, *et al.*, 2008).

Nestes trabalhos, diversos resíduos dentre os quais. papelão, *pelletes* de madeira, lodo proveniente do sistema de tratamento de efluentes, palha de café, casca de semente de girassol, cascas de avelã, casca de arroz, refugo de oliva, miscanthus e álamo foram avaliados. Realizou-se o estudo de viabilidade econômica do projeto de um reator apropriado para resíduos agrícolas, em conjunto com condições físicas apropriadas.

MELO, *et al.*, 2005 avaliou a viabilidade energética da palha de café como complemento da lenha em uma fornalha, operando a fogo indireto no aquecimento de ar para secagem de grãos. Durante os experimentos controlou-se a inserção de carga de palha de café em conjunto com lenhas de eucalipto, pois a palha por si só não teria condições de sustentar a chama de forma que as paredes da fornalha pudessem trocar calor com o ar de entrada. Avaliou-se o consumo de palha de café no intuito de se variar a temperatura de secagem pretendida entre  $45 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $55 \pm 2^\circ\text{C}$ . Os experimentos foram conduzidos em diferentes horários e condições de tempo, visto que as variações ambientais (temperatura, umidade relativa, isolamento e outros) dificultaram a repetição dos experimentos. A eficiência térmica foi satisfatória, pois para a vazão de ar de  $82,81 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  e temperatura do ar de  $46,4^\circ\text{C}$  a eficiência foi de 59, 8% e no segundo teste, quando a temperatura média do ar de secagem foi de  $55,4^\circ\text{C}$  a eficiência foi de 65, 9%. O aumento das vazões de ar, com consequente aumento do incremento da temperatura do ar de secagem

---

foram proporcionadas pelo aumento da quantidade de combustível palha de café como complemento à lenha de eucalipto.

Haykiri-Acma & Yaman, 2011 investigaram as diferentes propriedades do processo de combustão de alguns resíduos agrícolas, como exemplo: casca de semente de girassol, cascas de avelã, casca de arroz e refugo de oliva. Os testes com esses resíduos se basearam em vazão de ar seco e vazão de oxigênio puro. Essas biomassas foram escolhidas devido a relativa abundância na região da Turquia e por terem sido utilizadas como recursos energéticos por longo tempo. Nos experimentos, foram usados vazões de ar seco e oxigênio puro de 100 mL/min e o peso inicial das amostras foi de 10 mg. Houve aumento do valor de temperatura para até 900°C, numa taxa de aquecimento de 40°C por minuto.

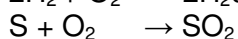
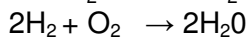
Os resultados mostraram que todas as espécies de biomassa avaliadas são ricas em compostos voláteis e o teor de carbono fixo é baixo comparado com o teor de voláteis. As reatividades térmicas das espécies avaliadas mudaram numa larga região de análise e o tipo de meio oxidativo no qual ocorreu o processo de combustão interferiu nos parâmetros de queima como por exemplo: ponto de ignição da combustão, taxa máxima de combustão e respectiva temperatura, assim como a temperatura final do processo de queima. A composição propriamente dita da biomassa em termos de celulose, lignina e hemicelulose interferem nas características da combustão. Os principais constituintes das amostras de biomassa, holocelulose e lignina, foram muito significantes na determinação da reatividade térmica e nas características exotérmicas do processo de queima.

Kok & Ozgur, 2012 desenvolveram base de dados para a combustão dos resíduos miscanthus, álamo e casca de arroz. Estudaram a aplicabilidade desses resíduos como combustível. Os experimentos foram realizados com amostras de biomassa pulverizadas (em torno de 10 mg) nos dispositivos do tipo calorímetro de varredura e termogravímetro. A vazão de ar utilizada foi constante e em torno de 50 mL.min<sup>-1</sup>. A faixa de temperatura para a realização dos experimentos foi de 20 a 600°C em cinco taxas de aquecimento diferentes: 5, 10, 15, 25 e 50 °C.min<sup>-1</sup>.

Segundo Bazzo (1995), a combustão é um fenômeno químico que acontece simultaneamente com processos de transferências de calor, massa e fluxo de

fluidos. Na queima de combustíveis sólidos e líquidos, a energia liberada é proveniente de reações químicas do carbono, hidrogênio e enxofre, conforme visualizado nas reações (Equações 1,2,3 e 4):

**- Reações de combustão completa**

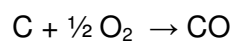


eq.(1)

eq.(2)

eq.(3)

**- Reações de combustão incompleta:**



eq.(4)

Supondo condições ideais do processo reacional, a combustão representa a oxidação completa da fração orgânica do combustível a gases. Três etapas descrevem essa conversão: secagem do combustível, pirólise/gaseificação (degradação térmica) e oxidação do resíduo sólido e dos gases de exaustão. A taxa de combustão da biomassa depende de vários fenômenos físicos, dentre eles cabe destacar dois predominantes: taxa de transferência de calor e taxa cinética de reação. Dessa forma, há que se considerar no mínimo 3 processos diferentes que interagem entre si na combustão da biomassa: pirólise do sólido (formação de compostos voláteis e sólido rico em carbono), queima de compostos voláteis e queima do resíduo sólido final. A combustão do material sólido carbonoso e da fase gasosa têm mecanismos cinéticos e químicos completamente diferentes. O tamanho de partícula determina a taxa de transferência de calor. A queima da matéria volátil é geralmente rápida enquanto a oxidação do carvão ocorre muito mais lentamente (VIRMOND, 2007).

O principal tipo de reator utilizado para a combustão da biomassa é o reator de leito fixo. Esse tipo de equipamento apresenta baixo custo de construção e operação além da tecnologia ser relativamente dominada. Segundo Loo; Koppejan, 2008 as fornalhas de grelha fixa são mais adequadas para instalações industriais de pequena escala. No entanto, como desvantagem cabe mencionar a baixa eficiência de operação (VIRMOND, 2007). Como inconveniente operacional do processo de combustão cabe destacar que não é fácil obter homogeneidade da razão ar/combustível em todo o volume de controle, o que implica que a composição dos gases de saída da chaminé tenham além de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , também  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$  e particulados. O particulado é responsável pela formação de fumaça negra na

exaustão dos gases. Também é produzido no volume de controle resíduo sólido da biomassa, composto de cinzas (K, Mg, Na, Ca, Si, Fe e P) além de carvão residual (RENDEIRO, *et al.*, 2008).

Acerca dos fundamentos teóricos da técnica de combustão direta expostos, resume-se as principais vantagens e desvantagens desta tecnologia de combustão direta para o aproveitamento energético de resíduos conforme mostrado no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Algumas vantagens e desvantagens da tecnologia de combustão direta para o aproveitamento energético de resíduos

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Combustão direta	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Permite o aproveitamento de resíduos gerados na própria propriedade agrícola</li> <li>-Com a utilização de equipamentos adequados, permite o aproveitamento da energia térmica da combustão em outros processos, como a geração de energia elétrica.</li> <li>-Há disponibilidade de equipamentos de fabricação nacional com diversas opções de fornecedores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concentração de fabricantes de equipamentos nas regiões Sul e Sudeste, o que implica em elevados custos de frete de equipamentos para comunidades de outras regiões do país.</li> <li>-Heterogeneidade dos resíduos dificulta o controle de variáveis operacionais;</li> <li>-A combustão direta a céu aberto é uma alternativa poluente</li> </ul>

Fonte: Adaptado de WIECHETECK, M., 2009

Comparada à outras tecnologias primárias termoquímicas de conversão (gaseificação e pirólise), a combustão direta é uma tecnologia mais simples, o que facilita implementá-la como forma de investimento inicial (www.esdb.bg , 2013). O Quadro 2.5 apresenta os principais fenômenos associados às diferenças entre as fases da combustão da biomassa, com o objetivo de destacar as principais diferenças entre pirólise e combustão direta.

Quadro 2.5 – Principais fenômenos associados às diferentes fases de combustão da biomassa.

Pirólise	Gaseificação	Combustão direta
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Degradação térmica (desvolatilização) do combustível na ausência de um agente oxidante externo</li> <li>-Liberação de compostos voláteis</li> <li>- Produção de alcatrão, resíduo carbonoso e gases de baixo peso molecular.</li> <li>- Formação de CO e CO<sub>2</sub> em combustíveis ricos em oxigênio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Degradação térmica (desvolatilização) do combustível na presença de um agente oxidante externo em quantidade insuficiente para que se dê uma oxidação completa.</li> <li>-Oxidação do resíduo carbonoso com CO<sub>2</sub> ou água.</li> <li>-A gaseificação pode ocorrer na presença de ar, oxigênio, vapor ou CO<sub>2</sub> enquanto agentes oxidantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Oxidação completa do combustível;</li> <li>-Oxidação dos produtos gasosos resultantes da pirólise e gaseificação;</li> <li>-Queima das partículas de resíduo carbonoso formadas durante a pirólise e gaseificação.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de SOUSA, 2009.

A diversidade de composição química entre os três resíduos avaliados representam uma amostra da heterogeneidade das características da biomassa independente de



---

sua origem. Isso tem implicação direta para o favorecimento de uma tecnologia química em relação à outra. A relevância da temática faz menção ao fato da possibilidade de valoração energética de resíduos frutíferos até então considerados pouco difundidos para o setor energético. Isso vem demonstrar possível redução da dependência de regiões agrícolas em relação aos grandes centros distribuidores de energia elétrica.

Com base em uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, não foram identificados trabalhos na literatura científica que abordem a elaboração de árvores de estado de processos para o aproveitamento de resíduos agrícolas. Os trabalhos em sua grande maioria abordam o estudo de tecnologias de conversão da biomassa de forma independente. O aproveitamento energético dos resíduos da casca de fruta de coco, de cacau e de café sob a sistemática de árvores de estado e posterior resolução pela aplicação de regras heurísticas demonstra a originalidade para análise das possibilidades de rotas tecnológicas conforme a metodologia do trabalho no capítulo seguinte.

---

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia se baseia conforme pesquisa de cunho documental. A revisão bibliográfica sobre aproveitamento de resíduos para valorização energética está pautada em teses, dissertações e artigos. Com respeito aos resíduos da casca do coco, café e cacau, verifica-se a adequação técnica de caracterização residual em relação as tecnologias químicas de biodigestão anaeróbia, combustão direta e pirólise. Para tanto, possibilidades de rotas de aproveitamento energético são dispostas em árvores de estado de processamento. A etapa de síntese das árvores de estado baseia-se na interpretação de dados técnicos de caracterização residual e tecnológica. Por meio do método da busca exaustiva, elabora-se a sequência de etapas de processo para cada ramo das árvores de estado. Neste capítulo, são discutidos aspectos qualitativos das tecnologias sugeridas destacando-se suas vantagens e desvantagens. Desta maneira, obtém-se um panorama de opções de rotas químicas e estruturais possíveis para cada resíduo.

#### **3.1 Fundamentos da Engenharia de Sistemas e Inteligência Artificial**

Por definição, os sistemas de engenharia de processo são formados por elementos e conexões. Os elementos por sua vez, são os equipamentos; as conexões são as correntes. A finalidade é a transformação de uma matéria-prima num produto de interesse. Esse conjunto de elementos interdependentes, sendo cada um responsável por executar uma ação específica, tem a finalidade da execução de uma ação complexa (PERLINGEIRO, 2005).

A elaboração de rota tecnológica como possível processo químico de aproveitamento residual, trata-se de exemplo da ação complexa de interesse a ser analisada. Esta sequência de etapas é conduzida em equipamentos específicos que dependem do tipo de operação unitária necessária. Dentre os fenômenos que

---

ocorrem cabe destacar: fenômenos do tipo reação química, absorção, adsorção, vaporização, condensação, compressão, expansão, aquecimento e resfriamento por exemplo (PERLINGEIRO, 2005).

O problema do projeto de processos pode ser representado por árvores de estado ou superestruturas. A representação por árvore de estados, proveniente da estratégia de decomposição, apresenta cada nível correspondente a um dos subsistemas de reação, de separação, de integração e de controle. Na representação por superestruturas, demonstra-se todas as estruturas viáveis que um sistema é capaz de assumir. Para isso, atribui-se um parâmetro binário a cada corrente. Dessa forma, cada estrutura viável é formada atribuindo-se a cada corrente, o valor 1 (presença) ou 0 (ausência) (PERLINGEIRO, 2005). Nesse trabalho de dissertação, o método de representação utilizado foi árvores de estado de processos.

A metodologia heurística utiliza um conjunto de regras, ordenadas ou não, formando uma base intuitiva para a tomada de decisão. Para tanto, é de esperar a ocorrência de conflitos entre as regras elaboradas e a possibilidade de serem encontradas diferentes soluções conforme o critério utilizado para priorizá-las, o que permite caracterizar esta metodologia como subjetiva. Com a finalidade da proposição da solução mais próxima da solução ótima, é de suma importância o conhecimento adquirido na prática industrial ou através de simulações e análises de processo, que por sua vez se verifiquem concordantes com a observação experimental (CARVALHO, 1995).

A contribuição desta pesquisa visa propor um conjunto de soluções viáveis por meio da elaboração de árvores de estado – representação do problema de síntese de processo. O foco do trabalho em questão trata da otimização estrutural - etapa de síntese e otimização tecnológica, para a proposição das rotas tecnológicas possíveis para a formação do produto principal. A etapa de análise, por sua vez, objetiva selecionar as rotas tecnológicas promissoras por meio da aplicação das regras heurísticas. Desta forma, para a proposição dos ramos de possibilidades de rotas químicas que irão compor as respectivas árvores de estado de processamento, destaca-se a análise crítica dos dados técnicos de caracterização residual, além dos

---

requisitos operacionais para realizar as etapas de beneficiamento e tratamento químico da biomassa.

Em função da heterogeneidade da biomassa utilizada como matéria prima e das possíveis tecnologias químicas para o projeto de processo, surge uma multiplicidade de rotas químicas para produção de um produto específico. O projeto de processos, sendo o problema de síntese representado por árvore de estado de processos químicos, pode ser subdividido em duas etapas: síntese e análise (PERLINGEIRO, 2005).

Na síntese, é gerado o conjunto das estruturas viáveis para o sistema químico de acordo com o máximo de considerações técnicas, em termos de equipamentos e condições operacionais possíveis. Devido às inúmeras possibilidades de propostas, a síntese pode ser considerada a etapa mais difícil do projeto, o que permite defini-lo como problema em aberto ou abstrato. Na etapa de análise, realiza-se a previsão e avaliação do desempenho de cada rota gerada a partir da árvore proposta, para se certificar da proposta de rota que forneça o melhor rendimento de produto desejável possível. O problema de análise, por sua vez, é considerado fechado, pois o ponto de partida é a árvore de estado de processos químicos gerada pela etapa de síntese. Nesse trabalho de dissertação o problema de análise é direcionado à aplicação do método indutivo do tipo heurístico.

Os trabalhos de síntese puramente heurísticos conduzem à esta postura clássica de projeto devido à própria natureza do método. Esses métodos de síntese, por sua vez, são somente baseados em regras intuitivas. Assim, não levam em consideração que uma sequência estrutural não selecionada, aparentemente inferior, pode vir a tornar-se mais econômica após a otimização de suas variáveis de processo. (CARVALHO, 1995).

### **3.2. Representação por Árvores de Estado de processos químicos**

Na maioria dos problemas reais, a multiplicidade de soluções viáveis complica o problema da etapa de síntese, o que exige o emprego de técnicas matemáticas

---

oriundas da Inteligência Artificial. Nesse trabalho de dissertação, a proposição das rotas tecnológicas mais viáveis de aproveitamento residual é possível devido à aplicação da técnica de busca exaustiva. A partir destas técnicas são elaboradas as possibilidades de sequências de equipamentos e/ou operações unitárias que sejam mais adequadas à obtenção do produto final de interesse, considerando as condições operacionais e de processo envolvidas.

O projeto de processo pode ser visualizado da seguinte forma:

- Projeto: problema de otimização – enunciado definido com métodos sistemáticos de resolução.
- Problema: subdividido em nível tecnológico (definição de rota química), nível estrutural (síntese) e nível paramétrico (análise).

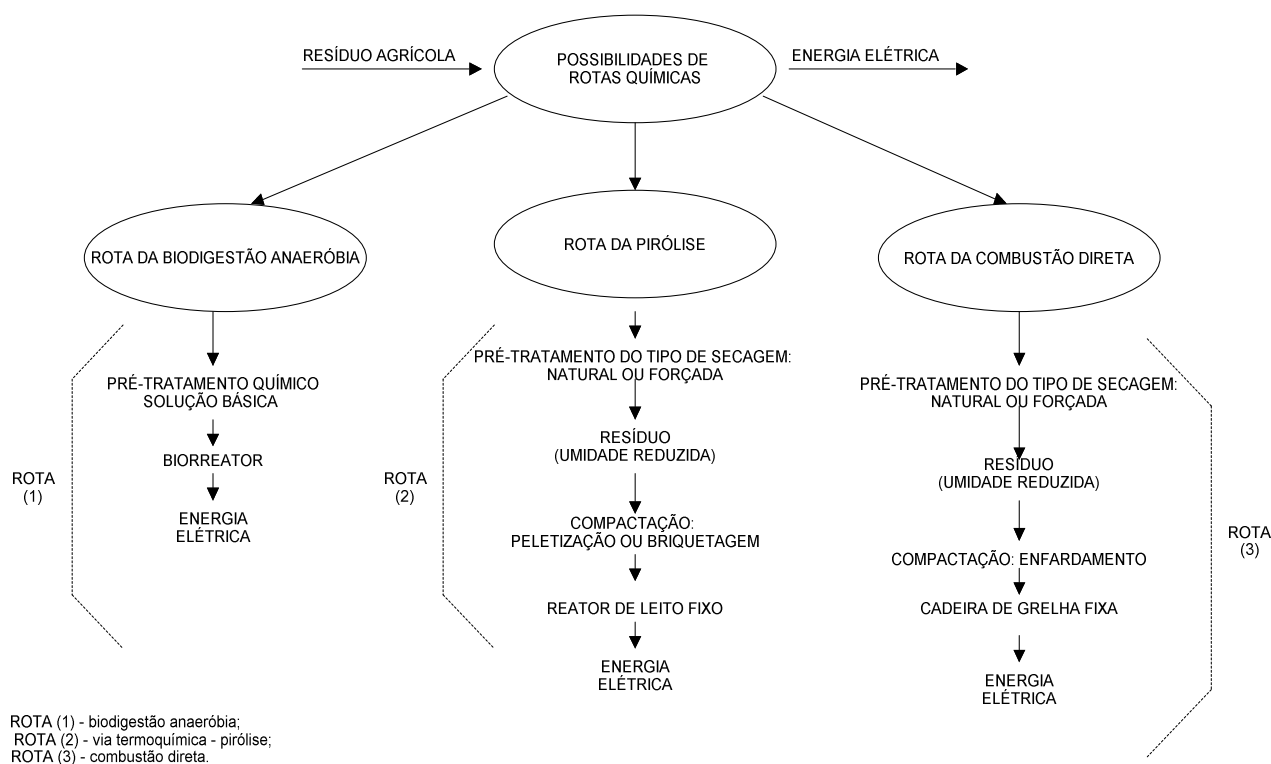
A metodologia do trabalho é direcionada a avaliar o problema de síntese a nível tecnológico e estrutural. A etapa de análise baseia-se na aplicação de técnicas heurísticas como método indutivo.

A abordagem de um processo químico pode ser subdividida em representação e resolução (PERLINGEIRO, 2005). A representação do tipo árvore de estados demonstra todas as possíveis rotas tecnológicas para o aproveitamento residual. A resolução, por sua vez, visa obter a solução ótima do problema orientado pela árvore de estados, pela aplicação de técnicas heurísticas.

Na Figura 3.1 tem-se a representação do que se conhece por árvore de estado de processos. É possível abranger o máximo de possibilidades de rotas químicas, ou seja, soluções possíveis sem repetições e sem o risco de se omitir a solução ótima. Assim sendo, tem-se uma sistemática para a síntese do projeto de processo em estudo, para os três resíduos propostos. São mostrados os principais elementos do problema combinatório de síntese para elaboração dos ramos das árvores de estado. Estes elementos são: resíduos da casca do cacau, coco e café; e tecnologias de beneficiamento do tipo secagem, pré-tratamento químico e compactação; além das tecnologias de conversão química da biomassa propriamente ditas: pirólise, combustão direta e biodigestão anaeróbia. Nota-se as

possibilidades de rotas tecnológicas que se diferenciam na medida em que o resíduo agrícola avaliado é substituído por outro; o que implica nas diferenças entre as três árvores de estado propostas. Cada rota tecnológica é composta por uma via química predominante. Há que se destacarem as etapas semelhantes entre as três possibilidades de rotas tecnológicas para cada árvore: operações de secagem (natural ou forçada), operações de compactação (briquetagem e peletização) e operações de conversão da energia térmica em energia elétrica.

Figura 3.1 – O problema do projeto de processos representado por uma Árvore de Estados. (Rota tecnológica 1: via química da Biodigestão anaeróbica, rota tecnológica 2: via química da pirólise, rota tecnológica 3: via química da combustão direta).



Em relação às possibilidades de rotas tecnológicas, cabe mencionar as seguintes etapas indispensáveis para a realização das vias químicas: Para a realização da via química de biodigestão anaeróbica é indispensável o pré-tratamento químico por adição de solução básica; para a via química de pirólise é indispensável a presença de um equipamento reator de leito fixo, além da compactação (pirólise ou briquetagem); e para a via de combustão direta, um equipamento do tipo caldeira de grelha fixa.

---

Mediante esses requisitos para elaboração das vias químicas e das possibilidades de combinações entre as etapas, são elaboradas as vias tecnológicas por meio da técnica de busca exaustiva, para elaboração dos ramos das árvores de estado. Esta, por sua vez, consiste em gerar todas as combinações possíveis dos elementos do problema, ao percorrer sucessivamente todos os ramos da árvore (PERLINGEIRO, 2005). Tais vias tecnológicas compõem os ramos das três árvores de estado de processos.

### **3.2.1 Premissas, hipóteses, limites e desafios para proposição das árvores de estado de processos**

#### **- Premissas**

Entendem-se como resíduos sólidos agrícolas todos aqueles, nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade, segundo a classificação da norma NBR 10.004/87, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (BARBOSA, et al., 2008).

As rotas químicas envolveram as tecnologias de principal interesse na análise: biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta. Além destas, cabe citar as de beneficiamento, como a limpeza, separação e arrefecimento (presente na etapa de pós-tratamento do *pellete* ou briquete produzido).

A aplicação das regras heurísticas deve se dar de modo sequencial. São elaboradas a partir de conhecimentos prévios das características dos resíduos de estudo, além das operações unitárias de secagem, compactação por peletização ou briquetagem e sobretudo dos fundamentos das tecnologias de biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta.

As rotas químicas são baseadas nos conceitos de produção mais limpa, sob a qual pretende-se minimizar ou até mesmo eliminar as causas e efeitos dos desperdícios de matérias primas e de energia.

---

### - Hipóteses

Em função do aspecto da sazonalidade das culturas agrícolas estudadas, não é levado em consideração a interferência do fator logístico para a proposta da rota tecnológica mais promissora.

Nas possíveis rotas que compõem as árvores de estado, considera-se como produto principal a energia elétrica.

Para as rotas de vias químicas do tipo combustão direta e conversão termoquímica, há que se destacar o aproveitamento do calor residual, nas etapas de densificação e de conversão da biomassa. Além disso, desconsidera-se também as perdas de energia nas etapas entre equipamentos diferentes.

Considera-se que apesar de as diferenças de caracterização dos três resíduos, para cada unidade de massa dos referidos resíduos, seja possível gerar quantidades próximas de energia elétrica.

### - Limites

A metodologia de aplicação da técnica heurística se limitou a aplicação das tecnologias de combustão direta, pirólise e biodigestão anaeróbia.

As técnicas heurísticas foram elaboradas com foco em aspectos da caracterização residual e principalmente das 3 tecnologias de conversão química em estudo.

A metodologia elaborada na dissertação se aplica à regiões agrárias próximas de lavouras produtoras de resíduos frutíferos do coco, cacau e café.

### - Desafios

Interdisciplinaridade e multidisciplinariedade envolvida no problema específico de estudo. Isso se verifica quando da adequação dos resíduos estudados às tecnologias de conversão de biomassa. É necessário o conhecimento de diferentes ramos da engenharia: processamento e agrária devido às características dos resíduos estudados, clima e solo.



---

A caracterização residual se distingue entre os resíduos estudados: coco, cacau e café. Após avaliar as operações unitárias em comum entre as rotas tecnológicas mais promissoras, obtêm-se uma sistematização para elaboração dos ramos das árvores para o aproveitamento de resíduo agrícola independente do tipo e origem.

Em vista de se realizar a técnica de busca exaustiva a partir dos ramos das árvores de estado de processos e restringir a explosão combinatória na etapa de síntese de processos, a elaboração das regras heurísticas são baseadas nas hipóteses, premissas, limites e desafios do modelo proposto.

### **3.3. Técnicas Heurísticas aplicadas à elaboração de rotas químicas**

Nesse trabalho de dissertação, a abordagem da metodologia por técnicas heurísticas se baseia nas seguintes etapas: definição do problema e adequação das características de um resíduo de estudo a pelo menos uma das vias químicas abordadas.

Regras heurísticas são regras práticas, acumuladas por meio de experiências práticas. São comprovadas pelo uso, a partir de evidências experimentais e também a partir de estudos de caso. A elaboração dessas regras estão relacionadas às restrições técnicas das etapas que compõem os ramos estruturais das árvores de estado. Para o trabalho de dissertação em questão, a elaboração das regras heurísticas está baseada na condição de operação dos equipamentos do tipo batelada.

#### **3.3.1. Regra heurística para etapa de beneficiamento prévio**

No que diz respeito às etapas de beneficiamento da biomassa para posterior aplicação da tecnologia química, cabe mencionar as particularidades inerentes para aplicação das vias de biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta. Para o

---

beneficiamento da via de pirólise, cabe ressaltar que o resíduo orgânico deve ter teor de umidade de até 12%. Além disso, se faz necessário etapa de resfriamento posterior à tecnologia de peletização/briquetagem, no preparo da biomassa. Para a pré-tratamento da biomassa com aplicação posterior da tecnologia de combustão direta, ressalta-se a necessidade do alto teor de fibras e baixa biodegradabilidade orgânica do resíduo. Em relação ao beneficiamento da biomassa para a tecnologia de biodigestão anaeróbia, menciona-se a importância da etapa de pré-tratamento químico com solução básica (NaOH ou  $\text{Ca(OH)}_2$ ).

#### **3.3.1.1. Regra heurística da etapa de moagem**

Antes da possibilidade de aplicação de uma das três vias químicas de conversão, destaca-se a regra heurística – da etapa de moagem - a ser avaliada:

- Se o material particulado de resíduo agrícola apresentar dimensão de partícula característica maior do que 5 a 10 mm: aplicar etapa de moagem, e
- Se o material particulado do resíduo agrícola apresentar dimensão de partícula característica menor ou igual a faixa de 5 a 10 mm: não aplicar a etapa de moagem.

#### **3.3.2. Regras heurísticas para escolha da via química – Biodigestão anaeróbia, pirólise e combustão direta.**

As regras heurísticas elaboradas para as vias químicas se baseiam em requisitos técnicos. Para a tecnologia de Biodigestão anaeróbia cabe destacar: resíduo perecível e presença de equipamento biorreator. Em relação à tecnologia de pirólise, é necessário que: o resíduo seja resistente às condições ambientais – umidade de

até 12% em base úmida (SILVEIRA, 2008), tenha teor de fibras elevado e baixa biodegradabilidade orgânica, além da presença de equipamento reator de leito fixo com temperatura média de operação de 700°C. Para a tecnologia de combustão direta, é necessário que o resíduo apresente alto teor de fibras e baixa biodegradabilidade orgânica, embora na literatura não seja mencionado faixa de umidade específica para aplicar essa tecnologia; e equipamento do tipo caldeira de grelha fixa.

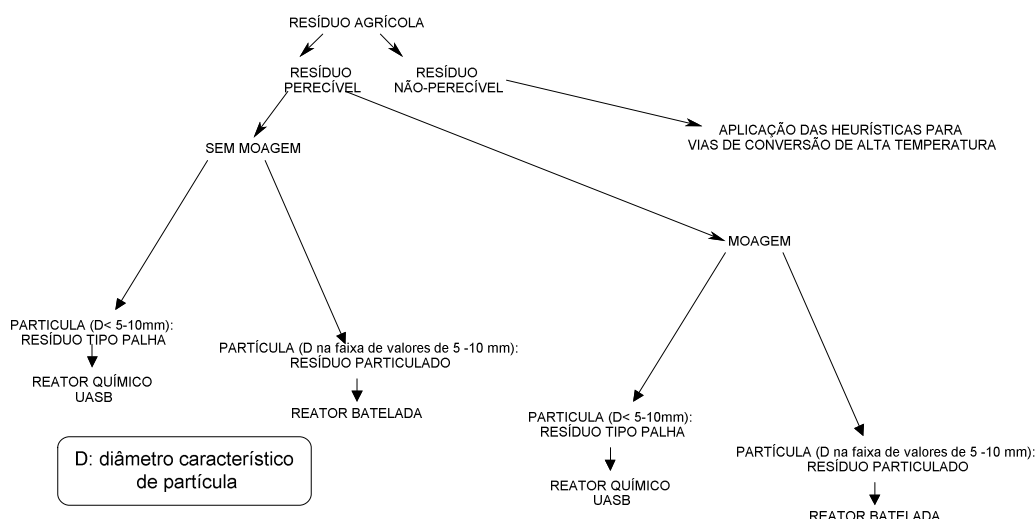
### 3.3.2.1. Regras Heurística - via biológica de Biodigestão Anaeróbia

#### 1. Equipamento biorreator anaeróbio batelada:

- Se o particulado de casca residual for de tamanho definido (diâmetro característico de 5 – 10 mm): utilizar biorreator anaeróbio batelada, e
- Se o particulado for do tipo "palha": utilizar biorreator anaeróbio de manta e fluxo ascendente (UASB).

A representação dessa heurística assim como as heurísticas relacionadas à etapa de beneficiamento da biomassa citadas, podem ser demonstradas no fluxograma mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Representação das regras heurísticas para a via de Biodigestão anaeróbia



---

### 3.3.2.2. Regras Heurísticas - via termoquímica do tipo Pirólise

#### 1. Avaliar o teor de umidade da biomassa analisada.

- Se a umidade em base úmida for menor ou igual aproximadamente a 12%, não se realiza pré-tratamento por secagem, e
- Se a umidade em base úmida for maior do que aproximadamente a 12%, realizar pré-tratamento por secagem.

#### 2. Etapa de pré-tratamento do tipo secagem:

- Se o particulado de casca residual for de alta superfície de contato, puder se processado em ambiente aberto e se for possível realizar o processo de secagem na escala de tempo em dias ou até meses, caso o resíduo seja de baixa biodegradabilidade: utilizar a secagem natural;
- Se o particulado de casca residual for de baixa superfície de contato com as condições ambientais, altamente biodegradável e se houver necessidade de secagem na escala de tempo em minutos ou até horas: utilizar a secagem forçada.

#### 3. Etapa de pré-tratamento do tipo compactação:

- Se o particulado de casca residual apresentar: diâmetro característico menor do que o valor de diâmetro de partícula médio representativo de 5 a 10 mm, umidade entre 8 e 12% em base úmida posterior à secagem (BIOMAX; BIOMACHINE, 2007 *apud.*, SILVEIRA, 2008), e além disso houver necessidade de pré-tratamento de secagem forçada ou natural com equipamento tambor rotativo (MALISIUS, 2000): utilizar a técnica de peletização;
- Se o particulado de casca residual apresentar: granulometria residual definida (diâmetro de partícula médio representativo de 5 a 10mm) (SILVEIRA, 2008) ou maior, teor de umidade entre 10 e 12% posterior à secagem (BIOMAX; BIOMACHINE, 2007 *apud.*, SILVEIRA, 2008), pré-

---

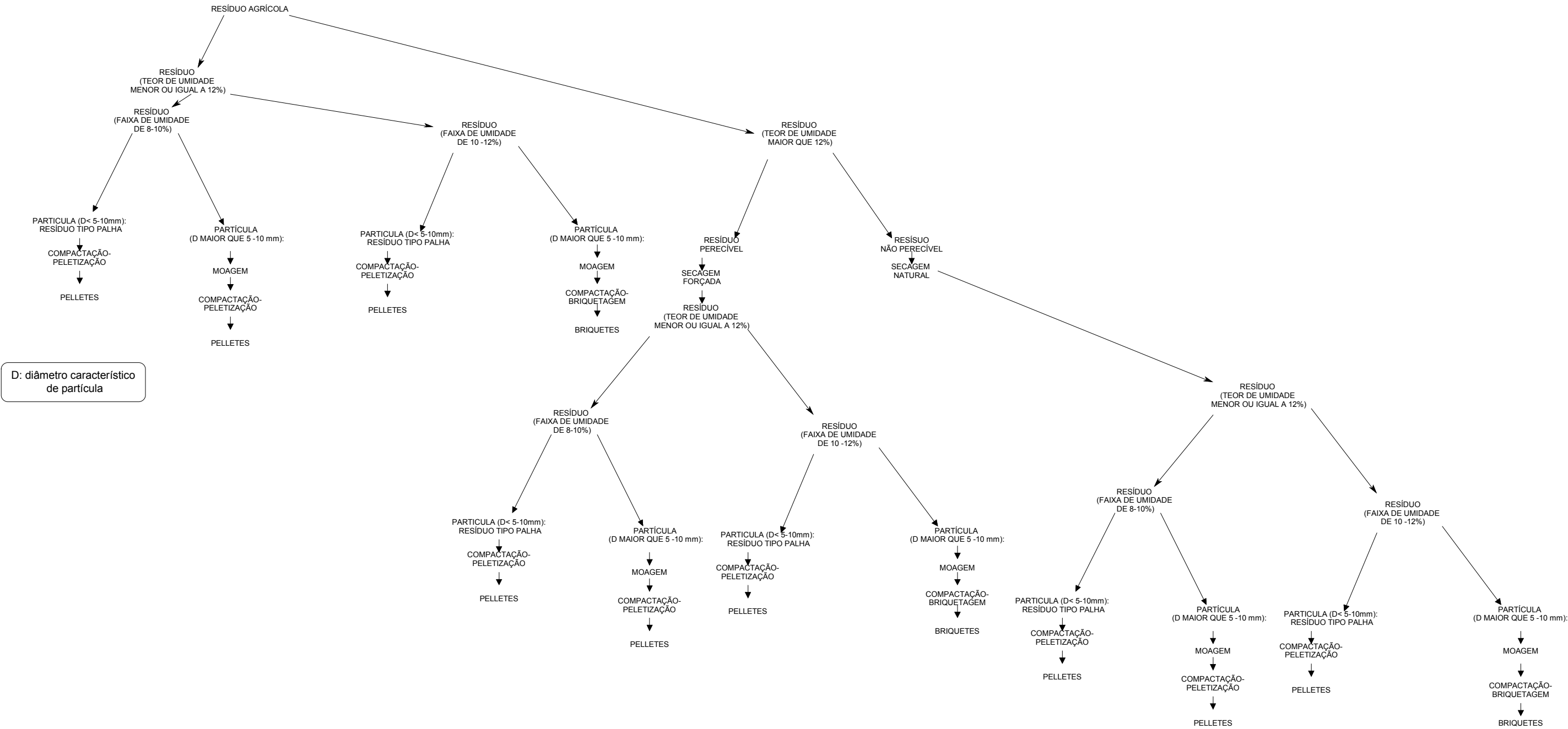
tratamento de secagem forçada com equipamento do tipo tambor rotativo (MALISIUS, 2000): utilizar a técnica de briquetagem.

4. Avaliar o poder calorífico superior do resíduo agrícola

- Se o particulado de resíduo agrícola apresentar valor mínimo de poder calorífico superior na faixa de valores de 22 a 24 MJ/Kg (ORSINI, 2012): aplicar a via química de pirólise;
- Se o particulado de resíduo agrícola apresentar valor mínimo de poder calorífico superior na faixa de valores de 19 a 20 MJ/Kg (ORSINI, 2012): aplicar a via química de combustão direta;

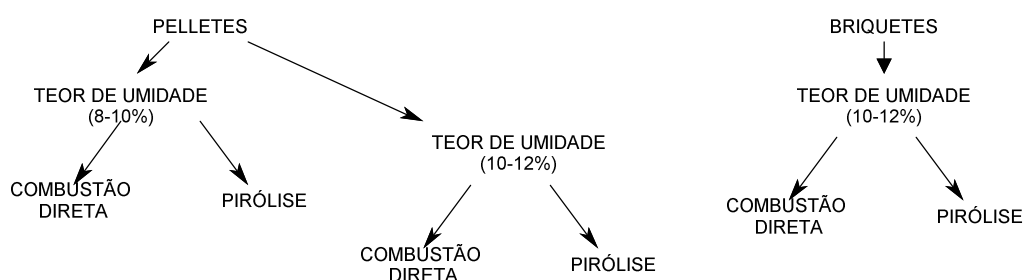
A representação dessas heurísticas assim como as heurísticas relacionadas à etapa de beneficiamento da biomassa citadas, podem ser demonstradas no fluxograma conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Representação das regras heurísticas para o beneficiamento da biomassa – via termoquímica



A partir das possibilidades de produtos intermediários provenientes da etapa de beneficiamento da biomassa – pellets com faixas de umidade de 8-10% e 10-12% e/ou briquetes com faixa de umidade de 10-12% - ao aplicar as heurísticas referentes à via termoquímica de pirólise, tem-se a representação das regras heurísticas conforme a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Representação das regras heurísticas aplicação da via termoquímica de conversão



### 3.3.2.3. Regras Heurísticas - via Combustão Direta

No que diz respeito a via de combustão direta convencional, a aplicação das regras heurísticas tem como finalidade o aproveitamento da energia térmica. Ainda que seja uma tecnologia de baixa eficiência; não se prioriza a realização de um pré-tratamento da biomassa com o rigor técnico da mesma forma que o pré-tratamento da via termoquímica de pirólise. Dessa forma, a escolha dessa via se baseia nas restrições das etapas de beneficiamento da biomassa citadas, além dos requisitos técnicos para aplicação dessa técnica propriamente dita. Como se trata de uma via química de alta temperatura assim como a via termoquímica de pirólise, em casos de aproveitamento da biomassa pela via química da pirólise; tem-se possibilidade também de aplicar a via da combustão direta. Nesses casos, antes da realização da combustão direta, aplica-se as regras heurísticas de pré-tratamento da biomassa referentes à via termoquímica de pirólise. Vale ressaltar que se a etapa de moagem se mostrar muito difícil, devido à consistência mecânica da biomassa em análise, realiza-se a combustão direta propriamente dita, sem necessariamente realizar as regras heurísticas de pré-tratamento referentes à via termoquímica de pirólise. Dessa forma, além de não se realizar secagem forçada para resíduos com diâmetro característico maior do que os valores referentes à faixa de 5 a 10mm (BIOMAX;

---

BIOMACHINE, 2007 apud., SILVEIRA, 2008), realiza-se a categoria de compactação do tipo enfardamento.

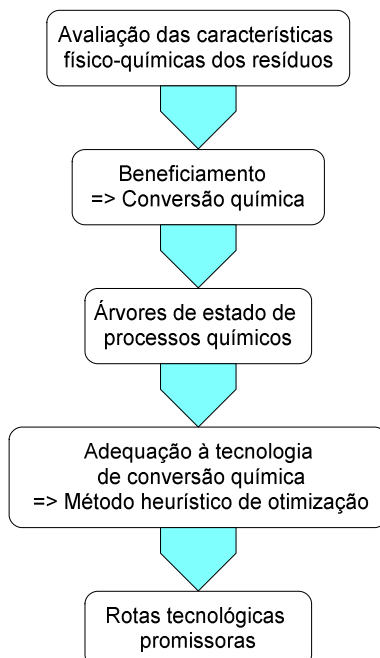
Conforme exposto, a metodologia está direcionada a obter os seguintes resultados para cada resíduo avaliado:

- tecnologia química promissora conforme característica do resíduo em estudo;
- proposição das árvores de estado de processos químicos para o aproveitamento dos resíduos, e
- determinação da rota tecnológica promissora para cada árvore de estado de acordo com a avaliação das regras heurísticas.

A metodologia desse trabalho de dissertação se baseia em pesquisa de fontes bibliográficas sobre o uso dos resíduos da casca do coco, do cacau e do café; para geração de bioenergia. A obtenção de dados técnicos foi realizada nas bases de dados de artigos científicos Elsevier ([www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)), revista Interfaces Científicas – Saúde e Ambiente, assim como dissertações e teses. Dessa forma, dados técnicos referenciados na elaboração de regras heurísticas e para auxílio na elaboração dos ramos das árvores de estado foram obtidos de estudos de geração de bioenergia. Resumidamente as etapas da metodologia podem ser sequenciadas segundo o diagrama de blocos da Figura 3.5, a partir do qual, serão elaborados os possíveis fluxogramas de processo representativos de cada rota tecnológica das árvores de estado.



Figura 3.5 – Síntese das etapas da metodologia em diagrama de blocos.



Neste trabalho de dissertação, a heterogeneidade da matéria-prima residual assim como o conhecimento prévio das operações unitárias para elaboração das etapas de processo; estão relacionados às tecnologias de conversão químicas escolhidas: combustão direta, pirólise e biodigestão anaeróbia. Mediante às inúmeras combinações possíveis para se converter a matéria prima em produto de interesse destaca-se a contribuição do método heurístico.

A vantagem da aplicação do método heurístico está correlacionada à proposta de metodologia do trabalho de dissertação em questão. Desta forma, segundo CARVALHO, 1995, a conveniência e a aplicabilidade dos métodos heurísticos decorrem da simplicidade e de sua grande capacidade em pesquisar e selecionar as melhores sequências, no universo de combinações possíveis.

---

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As árvores de estado de processo são elaboradas, considerando as hipóteses, premissas bem como limites descritos na metodologia. Para isso, realizou-se estudo prévio de adequação das características dos resíduos propostos assim como as tecnologias de conversão química. Diante da multiplicidade de soluções proveniente de cada árvore de estados – etapa de síntese; a etapa de otimização é realizada por meio da aplicação das regras heurísticas a cada uma das propostas de árvores de estado de processos. Como resultado, destaca-se uma das possibilidades de rotas tecnológicas de cada árvore para geração de energia elétrica. Obtém-se, portanto uma rota promissora para aproveitamento da casca do cacau, uma rota para casca do coco e uma para casca do café. Os principais resultados a serem obtidos para cada resíduo estudado podem ser divididos da seguinte forma: determinação da tecnologia química relevante para o aproveitamento do resíduo avaliado; proposta de árvore de estado; multiplicidade de soluções para cada árvore de estado, e determinação da rota tecnológica promissora.

Em vista das múltiplas possibilidades de tecnologias de aproveitamento energético de resíduos orgânicos, a forma de representação do problema de síntese se baseia na elaboração de árvores de estado de processos. Segundo a busca exaustiva orientada pelos ramos das árvores de estados, desenvolve-se uma sistemática que demonstre a aplicação destas tecnologias por meio de rotas tecnológicas. Nesse tipo de busca, são geradas todas as combinações possíveis dos elementos do problema, ao percorrer sucessivamente todos os ramos da árvore. Sendo assim, ao direcionar o estudo para as tecnologias de conversão química de interesse: biodigestão anaeróbia, combustão direta e pirólise; elaborou-se árvores de estado de processos para os resíduos da casca do cacau, coco e café. Para o trabalho em questão, as três árvores apresentadas a seguir têm como ponto de partida a representação geral do problema da síntese de processos de acordo com a metodologia, conforme mostrado pela Figura 3.1. Os ramos que compõem as árvores de estado foram estabelecidos de acordo com conhecimentos prévios de operações unitárias da indústria química e a partir dos requisitos técnicos inerentes

---

às tecnologias mencionadas, assim como dados secundários de fontes de pesquisa como dissertações, teses e artigos publicados. Vale ressaltar, que as representações mais detalhadas das respectivas árvores de estado: itens 4.1.1, 4.2.1 e 4.3.1; se encontram no Apêndice. As Figuras 4.1, 4.3 e 4.5 representam respectivamente as árvores de estado segundo os itens 4.1.1, 4.2.1 e 4.3.1.

Ao avaliar os três resíduos perante a análise das regras heurísticas, obteve-se como resultado a escolha da rota tecnológica considerada promissora para cada resíduo proposto, por meio da determinação da principal via química de aproveitamento energético do resíduo em estudo. Além disso, menciona-se outras possibilidades de aplicações de rotas tecnológicas para um mesmo resíduo em análise. A avaliação desses três resíduos abordados se dá conforme os Quadros 4.1, 4.2 e 4.3; além da respectiva argumentação. Mediante a determinação da via química mais adequada, além do tipo de pré-tratamento do resíduo estudado, obtém-se a rota tecnológica promissora para o resíduo do coco, do cacau e do café. Dessa forma, são apresentados nos itens 4.1.3, 4.2.3 e 4.3.3 as rotas tecnológicas promissoras assim como a argumentação que justifique a escolha destas rotas. Vale ressaltar que essas rotas estão apresentadas com maiores detalhes nas respectivas árvores de estado no Apêndice.

#### **4.1 Aproveitamento energético da casca do coco**

As principais tecnologias aplicadas à casca do coco são apresentadas no Quadro 4.1, mediante estudo prévio da caracterização residual conforme a literatura referenciada no Capítulo 2. Conforme estudo de Azevedo, *et al.*, 2008 o resíduo da casca apresenta teor de celulose de 43,44% e teor de lignina de 45,84%, segundo o Quadro 2.2. Destaca-se então o alto teor de fibras desse resíduo. Embora apresente 85% de umidade em base úmida, de acordo com Gonzales, *et al.*, 2013; a aplicação do resíduo da casca do coco se mostra mais adequada às tecnologias de conversão química a alta temperatura, podendo ser a via termoquímica de pirólise e via química convencional de combustão direta. Acerca da aplicação das regras heurísticas para vias químicas a alta temperatura; justifica-se a aplicação da combustão direta, pois o

poder calorífico superior da casca do coco verde (19,04 MJ/Kg) se encontra na faixa de valores entre 19 a 20 MJ/Kg, segundo Orsini, 2012. Ainda, a alta resistência mecânica e por conseguinte a dificuldade da realização da etapa de moagem contribuem para justificar a combustão direta como via química promissora, quando comparada com a avaliação da possível aplicação de outras tecnologias. Vale ressaltar outras possibilidades de aplicações deste resíduo: produção de carvão vegetal, produção de mantas e telas de solo, produção de papel e substrato para indústria de fertilizantes, dentre outras.

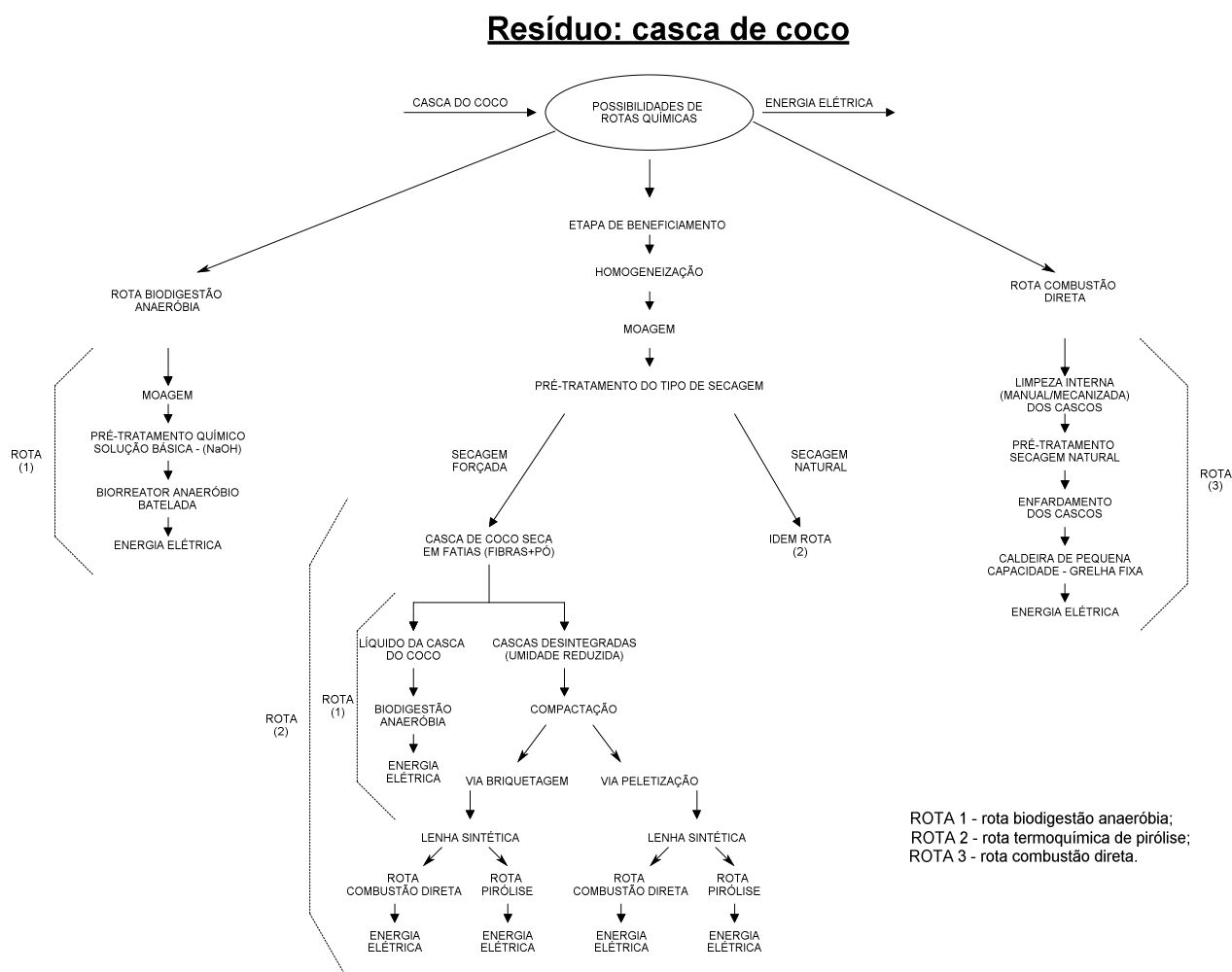
Quadro 4.1 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do coco

Quadro 4.1 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do coco			
Coco	Características de composição da casca do coco	Justificativa das alternativas tecnológicas	
		Biodigestão anaeróbia	Briquetagem/Peletização
			<div>Pirólise</div> <div>Combustão Direta</div>
	Fruto imaturo	Não favorável à casca do coco devido ao alto teor de fibras, a menos de um pré-tratamento químico (GONZALES, et al., 2013)	<div>Casca de coco na forma de carvão vegetal sintético (EMBRAPA, 2006)</div> <div>Geração de energia térmica (SILVA, G.O. &amp; JERÔNIMO, C.E., 2012)</div>
	Umidade na casca de 85% em base úmida (GONZALES, et al., 2013).		
	Não apresenta biodegradabilidade orgânica favorável- alto teor de fibras (SILVA, et al., 2003, <i>apud.</i> , SILVA, G.O. & JERÔNIMO, C.E., 2012)		
Possíveis aplicações a partir da casca do coco			
-Produção de energia térmica ou usado como carvão vegetal			
-Produção de mantas e telas do solo			
-Indústria de papel e substrato para fertilizantes			
(SILVA, et al., 2003, <i>apud.</i> , SILVA, G.O. & JERÔNIMO, C.E., 2012)			

#### 4.1.1. Proposta de árvore de estado para a casca do coco

Mediante a caracterização residual da casca de coco, tem-se a apresentação das múltiplas rotas químicas e estruturais, por meio dos ramos da árvore de estados proposta, conforme a Figura 4.1.

Figura 4.1 - Árvore de Estado de Processo – Casca do coco



Baseado na metodologia proposta no Capítulo 3, a via biológica de aproveitamento da casca do coco ocorre com a realização da Biodigestão anaeróbica da casca do coco em reator do tipo batelada, segundo a rota 1. Vale ressaltar a importância do

---

pré-tratamento químico com solução básica num tanque digestor primário para posterior geração de biogás com maior rendimento no tanque digestor secundário, conforme a Figura 2.8 (Pré-tratamento químico em solução básica para biodigestão anaeróbia). Há que se destacar que haveria outra possibilidade de realização da biodigestão anaeróbia, mediante a aplicação da carga pré-tratada num reator anaeróbico do tipo manta de lodo e fluxo ascendente (UASB). No entanto, em função de uma particularidade da casca do coco, devido à geração de fios de fibra ao invés de particulado propriamente dito, ter-se-ia o comprometimento da dinâmica de funcionamento interno do reator UASB, uma vez que o UASB é projetado para processamento de efluentes com particulados cujas dimensões não sejam muito diferentes entre si. Desta forma, conforme Chernicharo (1997) a eficiência da digestão anaeróbia está relacionada importância da geometria favorável de interação entre particulado de biomassa e células microbianas, para que ocorra a formação de agregado microbiano denso, denominado grânulo, o que é importante para a performance do reator UASB.

No que diz respeito à via de alta temperatura para o aproveitamento energético da casca do coco; devido à sua alta resistência mecânica, em consequência do alto teor de fibras têm-se duas possibilidades de técnicas de secagem: natural ou forçada. Posteriormente para o pré-tratamento do tipo compactação - peletização ou compactação - antes da realização da técnica de pirólise, segundo a rota 2. Em seguida há duas possibilidades de aproveitamento energético da lenha sintética: pirólise ou combustão direta. Cabe mencionar também que, segundo a rota 2, a partir do pré-tratamento para a realização da pirólise (ou combustão direta), durante a etapa de moagem, tem-se a geração de líquido orgânico residual da casca de coco, o que possibilita a aplicação da via química de biodigestão anaeróbia, segundo a rota 1.

A alta resistência da casca do coco representa um empecilho à realização da etapa de moagem. Dessa forma destaca-se a possibilidade de se aplicar a técnica de compactação mais simples do tipo enfardamento. Dessa forma, por não ser realizado pré-tratamento de compactação do tipo briquetagem ou peletização,

realização o via química de combustão direta para aproveitamento energético da casca do coco, segundo a rota 3

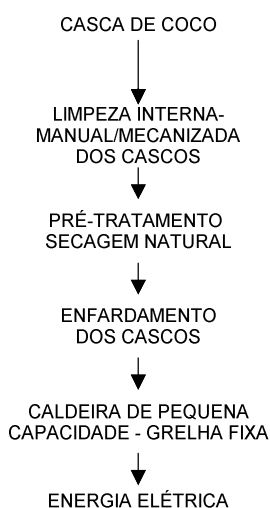
#### 4.1.2. Multiplicidade de soluções para árvore de estado da casca do coco

A partir da técnica de busca exaustiva para se obter todas as combinações possíveis de etapas de processamento da casca do coco, obtêm-se 12 rotas tecnológicas possíveis como soluções.

#### 4.1.3. Rota tecnológica promissora para a casca do coco

Obtêm-se a rota química promissora para a casca do coco a partir da caracterização residual e das tecnologias do Quadro 4.1. As regras heurísticas para escolha de uma das vias de rotas químicas predominantes foram avaliadas, mediante as características principais do resíduo da casca de coco. Conforme a Figura 4.2 tem-se a rota tecnológica escolhida.

Figura 4.2 - Rota tecnológica promissora da casca do coco



---

Com base na análise das características da casca de coco, assim como da argumentação da árvore de estado proposta, nota-se que a alternativa viável é destiná-lo para a via de rota tecnológica da combustão direta. Como justificativa, tem-se que:

- O pré-tratamento por secagem, se dá de forma natural. Apesar da umidade de 85%, (GONZALES, *et al.*, 2013), o alto teor de fibras proporciona resistência mecânica deste resíduo em relação à atuação de micro-organismos. No que diz respeito ao pré-tratamento do tipo compactação; segundo Mattos, *et al.*, 2013, a aplicação do beneficiamento de geração de pó e fibra para posterior compactação (peletização ou briquetagem) seria viável em municípios de maior porte, onde a geração de cascas de coco pelo consumo do fruto *in natura* possibilitaria a coleta de pelo menos 5000 cascas/dia. Seria viável também nas proximidades de indústria de envase de água de coco, com capacidade de processamento superior a 5000 frutos por dia.
- Em relação ao equipamento conversor, optou-se na rota pela presença do equipamento do tipo caldeira de grelha fixa, uma vez que a realização da combustão direta não demanda pré-tratamento rigoroso do combustível sólido. O mesmo apresenta poder calorífico superior de 19,04 MJ/Kg recomendada por Orsini (2012). Este valor, por sua vez, se encontra na faixa entre 19 e 20 MJ/Kg, o que é considerado um valor adequado à combustão direta, e aquém do valor necessário para aplicação da conversão química do tipo pirólise (faixa de valores de poder calorífico superior entre 22 e 24 MJ/Kg).
- No que diz respeito à via de biodigestão anaeróbia, não se justifica a referida via, em função da casca do coco apresentar baixa biodegradabilidade orgânica, conforme apresentado no Quadro 4.1.

Dessa forma, mediante o exposto, a tecnologia de combustão direta apesar de apresentar eficiência térmica baixa, proporciona um dos objetivos principais, que é gerar vapor a partir da combustão da casca e posterior geração de energia elétrica.



## 4.2. Aproveitamento energético da casca do cacau

As principais tecnologias aplicadas à casca do cacau são apresentadas no Quadro 4.2, mediante estudo prévio da caracterização residual conforme a literatura referenciada no Capítulo 2. Destacam-se como principais características a alta biodegradabilidade orgânica (GONZALES, *et al.*, 2013) e a umidade na casca de 12% (CARDOSO, *et al.*, 2002). Estas características principais citadas, assim como o teor de lipídios de 1,5 +/- 0,08 g/100g e o teor de açúcares de 10, 4 +/- 0,50 g/100g, perfazem na classificação desse resíduo ser perecível. Em vista do fato de ser um resíduo com alta biodegradabilidade orgânica, a tecnologia que se mostra mais adequada é a de biodigestão anaeróbia. Outras possibilidades de aplicação desse resíduo são: produção de biofertilizante e substrato para produção de enzimas.

Quadro 4.2 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do cacau

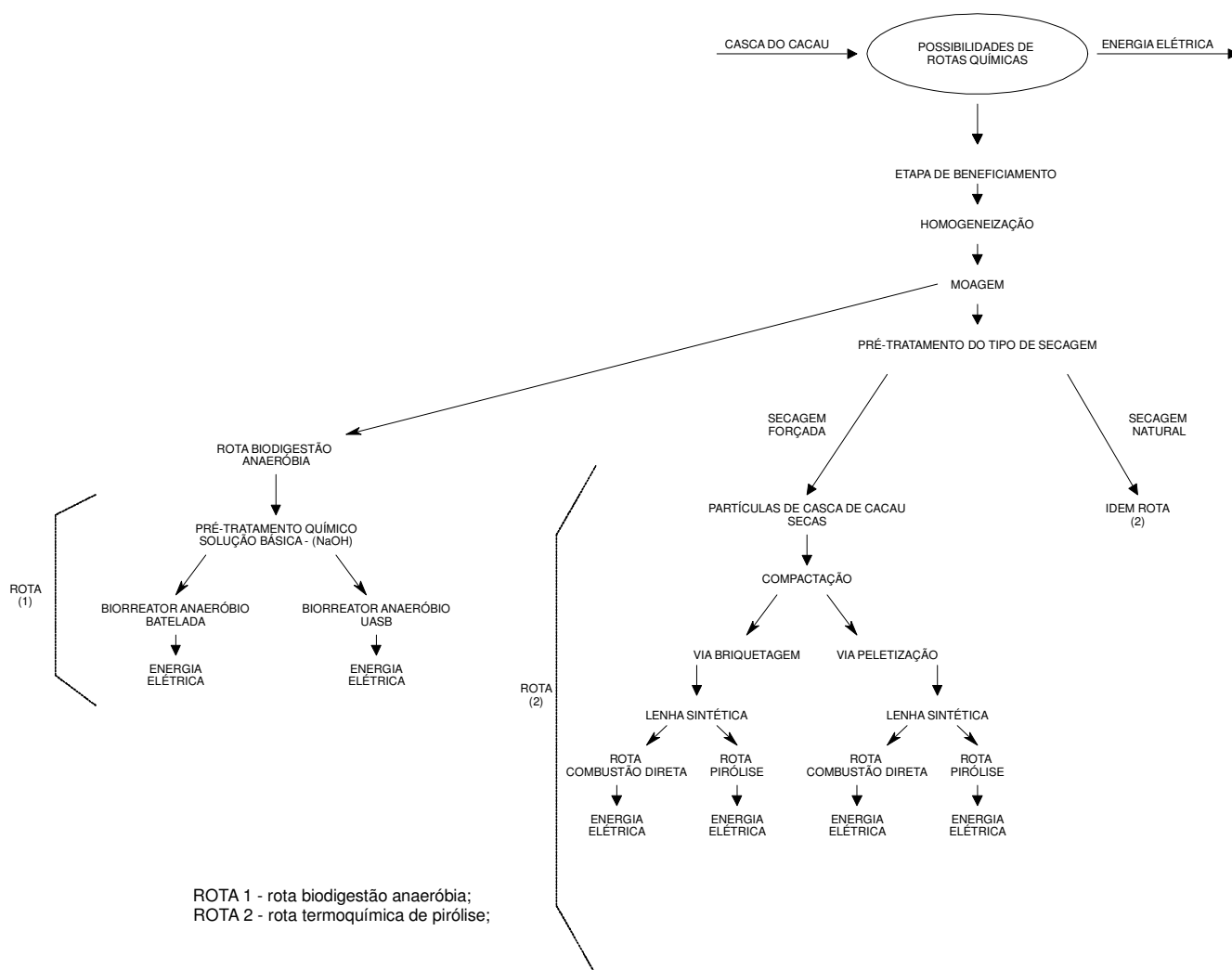
Quadro 4.2 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do cacau			
Cacau	Características de composição da casca do cacau	Justificativa das alternativas tecnológicas	
		Biodigestão anaeróbia	Briquetagem/Peletização
			Pirólise      Combustão Direta
	Teor de umidade na casca: 12% (CARDOSO, S. <i>et al.</i> , 2002)	Favorável às condições para ambientes (GONZALES, <i>et al.</i> , 2013)	Etapas consideradas inadequadas para resíduos perecíveis e com baixo teor de celulose (GONZALES, <i>et al.</i> , 2013).
	Apresenta biodegradabilidade orgânica favorável (GONZALES, <i>et al.</i> , 2013)		
Possíveis aplicações a partir da casca do cacau			
-Produção de biogás, biofertilizante, briquete e substrato para produção de enzimas			
(GONZALES, <i>et al.</i> , 2013)			

### 4.2.1 Árvore de Estado – Casca do cacau

Mediante a caracterização residual da casca de cacau, tem-se a apresentação das múltiplas rotas químicas e estruturais, por meio dos ramos da árvore de estados proposta, conforme a Figura 4.3.

Figura 4.3 - Árvore de Estado de Processo – Casca do cacau

#### Resíduo: casca do cacau



---

Baseado na metodologia proposta no Capítulo 3, a via biológica de aproveitamento da casca do cacau ocorre com a realização da Biodigestão anaeróbia em reator do tipo batelada ou reator do tipo manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), segundo a rota 1. Vale ressaltar a importância do pré-tratamento químico com solução básica num tanque digestor primário para posterior geração de biogás com maior rendimento no tanque digestor secundário, conforme a Figura 2.8 (Pré-tratamento químico em solução básica para biodigestão anaeróbia).

No que diz respeito à via de alta temperatura para o aproveitamento energético da casca do cacau, há que se destacar a importância do pré-tratamento do tipo secagem: natural ou forçada. Conforme estudo da caracterização residual, vale ressaltar que por ser um resíduo perecível e de baixa resistência mecânica, na condição de se realizar o processo de secagem; este deve durar pouco tempo, para que se evite deterioração da casca de cacau, considerada perecível. Posteriormente, realiza-se o pré-tratamento do tipo compactação - peletização ou compactação - antes da realização da técnica de pirólise, segundo a rota 2. Dessa forma, há duas possibilidades de aproveitamento energético da lenha sintética: pirólise ou combustão direta.

O alto teor de lipídeos e açúcares, assim como a baixa resistência mecânica representa um empecilho à realização da rota de combustão direta propriamente dita. Em vista disso, não se representou essa possibilidade de rota tecnológica como alternativa de aproveitamento energético da casca do cacau, de acordo com a Figura 4.3.

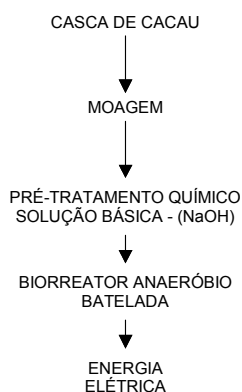
#### **4.2.2. Multiplicidade de soluções para árvore de estado da casca do cacau**

A partir da técnica de busca exaustiva para se obter todas as combinações possíveis de etapas de processamento da casca do cacau, obtêm-se 10 rotas tecnológicas possíveis como soluções.

#### 4.2.3. Rota química promissora – Casca do cacau

Obtém-se a rota química promissora para a casca do cacau a partir da caracterização residual do Quadro 4.2. As regras heurísticas para escolha das vias de rotas químicas foram avaliadas, mediante as características principais do resíduo da casca de cacau. Conforme a Figura 4.4 tem-se a rota tecnológica escolhida.

Figura 4.4 - Rota tecnológica promissora da casca do cacau



Com base na análise das características da casca de cacau, assim como da argumentação da árvore de estado proposta, nota-se que a alternativa viável é destiná-lo para a via de rota tecnológica da biodigestão anaeróbia. Como justificativa, tem-se que:

- O pré-tratamento por secagem e por compactação não são relevantes para esse tipo de caracterização residual, devido ao fato da casca do cacau ser de biodegradabilidade orgânica favorável à realização da biodigestão anaeróbia, segundo (GONZALES, et al., 2013). Dessa forma, sob condições ambientais, por ser um resíduo perecível, justifica-se seu aproveitamento por meio de uma tecnologia cuja aplicação seja adequada nas proximidades da lavoura. Dessa forma, opta-se pela via biológica do tipo biodigestão anaeróbia.
- Em relação ao equipamento conversor, em vista das duas possibilidades – biorretator batelada e biorreator de manta de lodo e fluxo ascendente - optou-

---

se pela presença do equipamento do tipo reator batelada. Esse equipamento é mais apropriado para carga orgânica de matéria-prima em pequenas quantidades, sem necessidade de fluxo de alimentação contínuo, para a boa operacionalidade do equipamento. Além disso, como condição operacional têm-se a temperatura de operação em torno de 34°C e pressão de 1 atmosfera.

Dessa forma, mediante o exposto, a tecnologia de biodigestão anaeróbia se mostrou mais adequado à finalidade proposta.

#### **4.3. Aproveitamento energético da casca do café**

As principais tecnologias aplicadas à casca do café são apresentadas no Quadro 4.3, mediante estudo prévio da caracterização residual conforme a literatura referenciada no capítulo 2. Dentre as principais características consideradas, cabe ressaltar: o alto teor de fibras em função do teor de fibra bruta: 17,7% a 21,0% e teor de matéria seca: 84,2% a 92,8% (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2000, apud., BAGGIO, J., 2006). Além disso, a baixa biodegradabilidade orgânica conforme ORSINI, 2012 e o teor de umidade em base úmida de 8,86% (ORSINI, 2012). Essas características por sua vez, favorecem a aplicação de tecnologias químicas de alta temperatura. Conforme a caracterização residual e a aplicação das regras heurísticas no que diz respeito a selecionar uma das duas rotas químicas, a justifica-se a rota química de pirólise como via promissora. Segundo ORSINI, 2012 o poder calorífico superior da casca do café (PCS de 23,64 MJ/Kg) está na faixa de valores de 22 a 24 MJ/Kg. Essa faixa de valores de poder calorífico de resíduo orgânico é considerada adequada para aplicação de um resíduo agrícola na tecnologia de conversão química do tipo pirólise. Sendo assim, a via termoquímica do tipo pirólise se mostrou mais adequada, quando comparada às outras tecnologias. Outras possibilidades de aplicação desse resíduo são: produção de hidrogênio (em função do teor em massa de aproximadamente 5,5%) e produção de biodiesel com a borra do café.

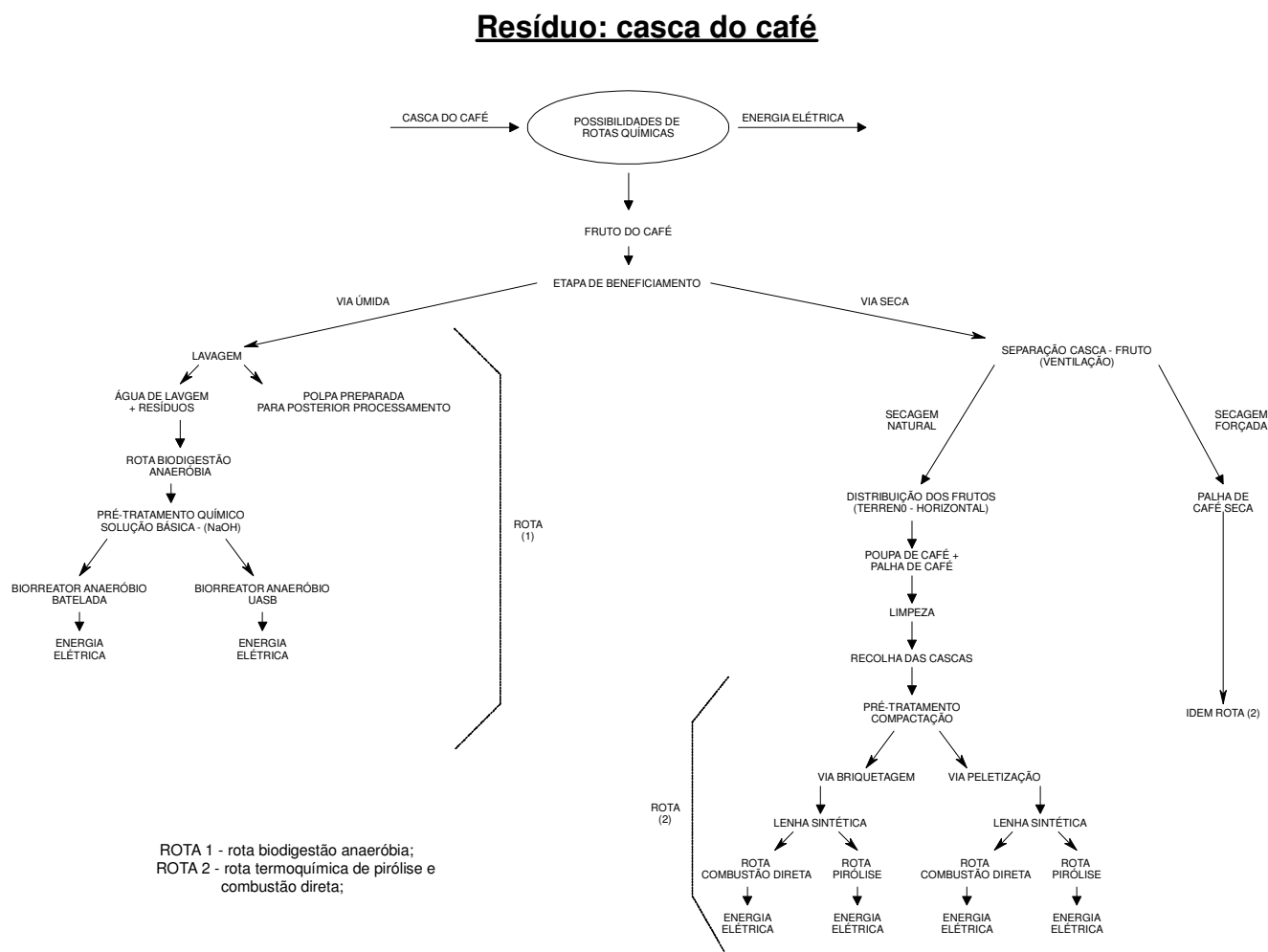
Quadro 4.3 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do café

Quadro 4.3 – Tecnologias químicas aplicadas à casca do café			
Café	Características de composição da casca do café	Justificativa das alternativas tecnológicas	
		Biodigestão anaeróbia	Briquetagem/Peletização
			<div>Pirólise</div> <div>Combustão Direta</div>
	<p>Teor de umidade na casca de 8,86% (ORSINI, 2012).</p> <p>Alto teor de fibras - teor de fibra bruta: 17,7% a 21,0% e teor de matéria seca: 84,2% a 92,8% (RIBEIRO FILHO <i>et al.</i>, 2000, <i>apud.</i>, BAGGIO, J., 2006).</p> <p>Baixa biodegradabilidade orgânica (ORSINI, 2012)</p>	<p>Aplicada se o processamento dos grãos de café for feito em via úmida (PRADO, <i>et al.</i>, 2008)</p>	<p>Aplicada se o processamento dos grãos de café for feito em via seca (ORSINI, 2012)</p> <p>Aplicação da casca de café em conjunto com lenha de eucalipto para o aquecimento indireto de ar para secagem de produtos agrícolas (MELO, <i>et al.</i>, 2005)</p>
Possíveis aplicações a partir da casca do café			
-Produção de biogás e briquete (ORSINI, 2012)			
-Produção de lodo (via úmida) e efluente líquido clarificado (CAMPOS., <i>et al.</i> , 2002; METCALF & EDDY., 2003; WAUGH, 1997)			

#### 4.3.1 Árvore de Estado – Casca do café

Mediante a caracterização residual da casca de café, tem-se a apresentação das múltiplas rotas químicas e estruturais, por meio dos ramos da árvore de estados proposta, conforme a Figura 4.5.

Figura 4.5 - Árvore de Estado de Processo – Casca do café



A discussão da árvore de estados para o resíduo da casca de café baseia-se na metodologia proposta no Capítulo 3, e devido ao fato da colheita do café ser de dois tipos: beneficiamento em via úmida ou via seca dos frutos do café, para a retirada da casca em torno da polpa. Dessa forma, no que diz respeito a via úmida de beneficiamento, a elaboração das rotas tecnológicas de aproveitamento do resíduo considerando a via biológica de aproveitamento da casca do café ocorre com a realização da biodigestão anaeróbia em biorreator do tipo batelada ou biorreator de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), segundo a rota 1. Vale ressaltar a importância do pré-tratamento químico com solução básica num tanque digestor primário para posterior geração de biogás com maior rendimento no tanque digestor

---

secundário, conforme a Figura 2.8 (Pré-tratamento químico em solução básica para biodigestão anaeróbia).

No que diz respeito a via seca de beneficiamento, tem-se a elaboração de rotas tecnológicas de alta temperatura. A casca do café, devido à sua alta resistência mecânica, em consequência do alto teor de fibras pode ser direcionada a duas possibilidades de técnicas de secagem: natural ou forçada. Posteriormente, realiza-se o pré-tratamento do tipo compactação - peletização ou compactação - antes da realização da técnica de pirólise (ou combustão direta), o que representa duas possibilidades de aproveitamento energético da lenha sintética, segundo a rota 2.

A alta resistência da casca do café representa um empecilho à realização da etapa de moagem. Dessa forma destaca-se a possibilidade de se aplicar a técnica de compactação mais simples do tipo enfardamento. Dessa forma, por não ser realizado pré-tratamento de compactação do tipo briquetagem ou peletização, realiza-se o via química de combustão direta para aproveitamento energético da casca do café, segundo a rota 3.

A inexistência de um diâmetro de partícula característico na faixa de 5 - 10 mm, representa um empecilho à realização da rota de combustão direta propriamente dita. A realização da compactação até permite a aplicação da técnica de combustão direta. No entanto, não é vantagem investir numa técnica de compactação específica – briquetagem ou peletização – e posterior aplicação de uma tecnologia cuja finalidade se restringe apenas a produzir calor e ser de baixa eficiência. Em vista disso, não se representou essa possibilidade de rota tecnológica como alternativa de aproveitamento energético da casca do café, de acordo com a Figura 4.5.



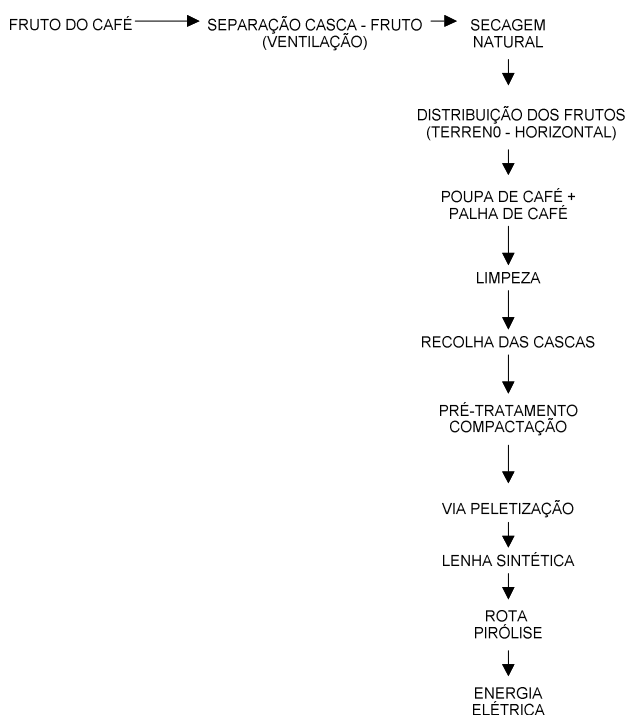
#### 4.3.2. Multiplicidade de soluções para árvore de estado da casca do café

A partir da técnica de busca exaustiva para se obter todas as combinações possíveis de etapas de processamento da casca do café, obtêm-se 10 rotas tecnológicas possíveis como soluções.

#### 4.3.3. Rota tecnológica promissora para a casca do café

Obtém-se a rota química promissora para a casca do café a partir da caracterização residual do Quadro 4.3. As regras heurísticas para escolha de uma das vias de rotas químicas predominantes foram avaliadas, mediante as características principais do resíduo da casca de café. Conforme a Figura 4.6 tem-se a rota tecnológica escolhida.

Figura 4.6 - Rota tecnológica promissora da casca do café



---

Com base na análise das características da casca de cacau, assim como da argumentação da árvore de estado proposta, nota-se que a alternativa viável é destiná-lo para a via de rota tecnológica da pirólise, precedida de compactação por peletização. Como justificativa, tem-se que:

- No que diz respeito à etapa de beneficiamento, seleciona-se a via seca para separação dos frutos em relação à palha do café. Os frutos do café são dispostos num terreiro horizontal, o que favorece a secagem do tipo natural. Isso se dá devido à alta superfície de contato da palha de café em relação às condições ambientais e teor de umidade de apenas 8,86% em base úmida (ORSINI, 2012). Além disso, não há dependência de recurso hídrico para separação do resíduo casca de café em relação ao fruto (polpa). As características de alto teor de fibras e baixa biodegradabilidade orgânica, conforme o Quadro 4.3, não justifica a escolha da biodigestão anaeróbia. Dessa forma, a casca do café apresenta maior tendência de aplicação nas tecnologias de alta temperatura, a pirólise e combustão direta por exemplo. Em vista da palha de café apresentar granulometria com diâmetro menor do que 5-10 mm, justifica-se a realização da técnica de compactação por peletização conforme Werther, 2000.
- O poder calorífico superior da palha de café de 23,64 MJ/Kg (PCS) (ORSINI, 2012), justifica a aplicação da tecnologia de conversão química do tipo pirólise. Para tal, se faz necessário equipamento reator com temperatura em torno de 700°C.

Estudos no setor de bioenergia, para aplicação das tecnologias de conversão química mencionadas no trabalho, já são uma realidade no país. A maior parte dos dados referenciados são provenientes de artigos com estudo das tecnologias abordadas de forma individual. Dessa forma, espera-se evidência desse trabalho de dissertação no que diz respeito a representar suporte para futuros estudos de aproveitamento energético, além dos mencionados, de outros tipos de resíduos.

---

## 5 CONCLUSÕES

A metodologia utilizada neste trabalho de dissertação se mostrou adequada, mediante a aplicação do método de representação por meio de Árvore de Estados para o problema de síntese de processos. Nesse trabalho, realizou-se a caracterização dos resíduos da casca do coco, cacau e café, além da análise dos fundamentos das tecnologias citadas na revisão bibliográfica. Diante disso, realizou-se uma busca orientada por árvores de estado para cada resíduo, como forma de representação do problema de síntese das vias tecnológicas de aproveitamento para cada resíduo. A elaboração das três árvores de estado, apresentadas nos resultados deste trabalho, se baseou em hipóteses, premissas, limites, desafios, conforme o item 3.2.1.

A utilização do método heurístico, para a realização da otimização estrutural e tecnológica, possibilitou obter a rota tecnológica promissora a partir de cada árvore de estado proposta, de forma que; os principais resultados obtidos são:

- rota da digestão anaeróbia precedida de pré-tratamento químico em solução básica como a rota tecnológica mais promissora para o resíduo da casca de cacau;
- rota de combustão direta, realizada em caldeira de grelha fixa para o resíduo casca de coco, e
- rota de conversão termoquímica do tipo pirólise precedida de compactação do tipo peletização se mostrou mais promissora para o resíduo da casca de café.

As rotas tecnológicas promissoras obtidas, basearam-se na utilização da síntese heurística como etapa independente da otimização rigorosa de cada seqüência, através de modelagem matemática para esta finalidade.

A contribuição deste trabalho de pesquisa diz respeito a enfatizar a aplicação de uma técnica de aproveitamento energético em relação a outra. Isso ocorre mediante a metodologia adotada, que por sua vez, se mostrou adequada à diversidade de

---

composição química entre os três resíduos avaliados. Embora a amostra da heterogeneidade das características das biomassas disponíveis – por meio dos três resíduos em estudo - possibilite a aplicação de um vasto conjunto de tecnologias químicas, as regras heurísticas propostas justificaram a seleção de uma rota tecnológica mais promissora para cada resíduo avaliado, a partir das respectivas árvores de estado para a casca do coco, do cacau e do café.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para novos pesquisadores interessados no tema deste trabalho, têm-se as seguintes sugestões:

- Estudo do real potencial energético da biomassa conforme a composição real de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas;
- Análise das viabilidades do aproveitamento energético de resíduos agrícolas sob análise do aspecto logístico, e
- Análise econômica de rotas tecnológicas selecionadas a partir das árvores de estado de processos dos resíduos avaliados.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, J.L. **Fontes de Energia**. Editora da Universidade de Brasília, p.277-279, 1994.

ALAKANGAS, E. **Wood pellets in Finland - Technology, Economy and Market**. OPEN Bloch L.T. Conference on pellets. Finlândia. 2002.

ASPE. Agência de Serviços Públicos de Energia do Espírito Santo- Atlas de Bioenergia do Espírito Santo. [http://www.aspe.es.gov.br/download/Atlas\\_de\\_Bioenergia\\_do\\_Espirito\\_Santo.pdf](http://www.aspe.es.gov.br/download/Atlas_de_Bioenergia_do_Espirito_Santo.pdf). Acesso em 09 de abril de 2014. Vitória – ES. 2013.

ANDRADE, *et al.*, **Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal**. Sociedade de Investigações Florestais. R. Árvore, Viçosa – MG, v.28, n.5, p.707- 714, 2004.

ARAÚJO, D.S.S. **Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NOx, SO2, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado**. Dissertação. 2008. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2008.

AZEVEDO, B. S. M. A. et al. **Utilização da fibra da casca de coco verde como suporte para formação de biofilme visando o tratamento de efluentes**. Série Tecnologia Ambiental. Brasília: CETEM/MCT, 2008.

BAGGIO, J. **Avaliação dos resíduos (casca e pó orgânico) de café (*Coffea Arabica* L.) como provável fonte de substâncias bioativas**. Dissertação. 2006. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2006.

---

BARAZARTE, H.; SANGRONIS, E.; UNAI, E. La cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.): uma posible fuente comercial de pectinas. **Archives Latinoamericanos de Nutrición**, v.58, p.64-70, 2008.

BATISTA, R.R., ZANETTI, A., SARTORI, D.J.M., ARRIECHE, L.S. Avaliação do diâmetro de partícula da casca do cacau na geração de biogás. **Congresso de Sistemas particulados**. Maceió – AL. 2013.

BARBOSA, E.A., AZEVEDO, C.A.V., RAO, T.V.R., FURLANETTO, E.L. Uma proposta de gestão ambiental em resíduos sólidos para centrais de abastecimento de produtos agrícolas e agroindustriais. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande**, v.10, n.2, p.181-191, 2008. ISSN 1517-8595.

BARNETT, A., PYKE, LEO & SUBRAMANIAN, S.K. **Biogas technology in the Third World: a multidisciplinary review**. IDRC, Ottawa, Canada. 51, 1978.

BARNICKI, S.D. & SIROLA, J.J., Process synthesis prospective. **Computers and Chemical Engineering**, v.28 (2004) 441-446. ELSEVIER edition. 2004.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. ver. ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 216p. (Série Didática).

BADOCHA, T. E.; COSTA, R. S. C.; LEONIDAS, F. C. Casca de Café: um importante insumo para a agricultura orgânica. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 3., 2003, Porto Seguro-BA. Anais do III Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Porto Seguro, 2003.

BARCELOS, A. F. *et al.* Características fermentativas de silagens de polpa de café com diferentes proporções de casca de café. **B. Indústr. anim., N. Odessa**, v.70, n.3, p.206-214, 2013.

BIOMACHINE. **Briquetes**. Disponível em: <<http://www.biomachine.com.br/biomachine.asp>>. Acesso em: dezembro de 2013.

BIOMAX. **Briquetes**. Disponível em: <<http://www.biomaxind.com.br/site.html>>. Acesso em agosto de 2012.

---

BOUALLAGUI, H.; TOUHAMI, Y.; CHEIKH, R.B.; HAMDI, M. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. **Process Biochemistry**, v. 40 (2005) 989-995. 2005.

BRÁS, A.M., MIRANDA, F., HIPÓLITO, L., & DIAS, L.S. (2006). **Biomassa e produção de energia**. *O Minho a Terra e o Homem*, 23 – 30. 2006.

Bridgwater, A., Czernik, S., Diebold, J., Meier, D., Oasmaa, A., Peacocke, C., Piskorz, J. and Radlein, D. 2003. Fast Pyrolysis of Biomass: **A Handbook**. 1, CPL Press, UK.

BRIDGWATER, A.V., **Review of fast pyrolysis of biomass and producing upgrading**. 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved. 2011.

CARVALHO, C.A.C. **Síntese e otimização de sequências de destilação utilizando simuladores comerciais**. Dissertação. 1995. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

CABELLO, P.E.; SCOGNAMIGLIO, F.P.; TERÁN, F.J.C. **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio de leito fluidizado**. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v.6, n.1, p. 321-338, jan/abr 2009.

CAMPOS, C. M. M.; CARMO, A. C.; LUIZ, F. A. R. **Impacto ambiental causado pela poluição hídrica proveniente do processamento úmido do café**. Revista Cafeicultura, Patrocínio, v. 1, n. 4, nov. 2002.

CARDOSO, S.M.; COIMBRA, M.A.; LOPES da SILVA, J.A. **Temperature dependence of the formation and melting of pectin-Ca<sup>2+</sup> networks: a rheological study**. Food Hydrocolloids, v.17, p. 801 – 807, 2003.

CHERNICHARO, C. A. L., Reatores anaeróbios. Princípios do tratamento Biológico de águas residuárias. **DESA/UFMG**. Belo Horizonte – MG, v.5, 1997.

CORTEZ, C.L., **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores para a geração de energia: estudo de caso**: 2011. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CONSERVAÇÃO INTERNACIONAL. Economia verde: Desafios e oportunidades. 2011. Grupo de Design Gráfico Ltda. Belo Horizonte, 2011.



---

DEMAJORIVIC, J. **Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos: as novas prioridades.** Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v.35, n.3, p 88-93, 1995.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction.** Weinhein-Germany: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.31, p.171-192, 2005.

DIAS, *et al.*, **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais.** Embrapa-Agroenergia. Brasília\_DF, 2012.

DONKOH, A. et al., Chemical composition of cocoa pod husk and its effect on growth and food efficiency in brailer chicks. **Animal Feed Science and Technology**, v. 35, p. 161-169, 1991.

EMBRAPA, **Plano Nacional de Agroenergia**, 2006. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF- 2ª edição revisada. 2006.

FAO Y CONSEJO MUNDIAL DE LA ENERGIA: **Mayor prioridad a los problemas de energia en las zonas rurales.** Disponível em [http://www.fao.org/waicent/ois/press\\_ne/pressspa/2000/prsp0001.htm](http://www.fao.org/waicent/ois/press_ne/pressspa/2000/prsp0001.htm). Acesso em 2013.

FARAGE, R. M. P. **Aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos gerados no Polo Moveleiro de Ubá para fins energéticos.** 2009. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

FEAM, 2012. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de minas gerais\_** feam/dped/gemuc. 2012

FELIZOLA, C.S., LEITE, V.D., PRASAD, S., Estudo do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. **Agropecuária Técnica** - v.27, n.1, 2006

---

FONTENELE, R., **Cultura do coco no brasil: caracterização do mercado atual e perspectivas futuras**, XLIII congresso da SOBER, 2005.

GONZALES, A.D.F.; VITAL, A.V.D.; LIMA, J.M.; RODRIGUES, M.B.S.; Desenvolvimento sustentável para o resgate da cultura do cacau baseado no aproveitamento de resíduos. **Interfaces Científicas – Saúde e Ambiente – Aracaju**. V.1.nº2. p.41-52. Fev. 2013.

Harwood, J.H. Pesquisas para produção de biogás na Amazônia. **ACTA AMAZONICA**, v.10 (2), p.403 – 409, 1980.

HAYKIRI-ACMA, H. & YAMAN, S. **Comparison of the combustion behaviors of agricultural wastes under dry air and oxygen**. World Renewable Energy Congress 2011 – Sweden 8 -13. May 2011, Linkoping, Sweden.

HENRARD, A. A., MEZA, L.H.R., BORGES, J.A., ROSA, G.M.da, ANDRADE, M. da R., OGRODOWSKI, R. & COSTA, J. A. V. **Produção de biogás a partir de biomassa microalgal**. Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Escola de Química e Alimentos, Laboratório de Engenharia Bioquímica, 2007.

**“Instituições, Eficiência, Gestão e Contratos no Sistema Agroindustrial”** - 2005. Disponível em: <http://www.sober.org.br/palestra/2/168.pdf>. Acesso em: 01 de setembro de 2013.

International CMO Business Biomass. Site: <http://www.internationalrenewablesenergy.com/>. Acesso em 9 de janeiro de 2014.

JORGE, L.C., **Estudo de viabilidade de implantação de biodigestores anaeróbios**. Dissertação( Mestrado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental. Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói - RJ. Niterói - 2004.

KELLEHER, B.P.; LEAHY, J.J.; HENIHAN, A.M.; O'Dwyer, T.F.; SUTTON, D.; LEAHY, M.J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. **Bioresource Technology**. V.83, p.27-36, 2002.

---

KIRUTHIKA, R. *et al.*, **Bio oil Production from various Agro Residues through Pyrolysis**. Vol. 2. Issue 9. International Journal of Engineering Research of Technology (IJERT). ISSN:2278-0181. September, 2013.

KOK, M.V. & OZGUR, E. **Thermal analysis and kinetics of biomass samples**. Journal ELSEVIER. Fuel Processing Technology. Department of Petroleum and Natural Gas Engineering. Middle East Technical University, Ankara, Turkey. 2013.

LOO, S.V; KOPPEJAN, J. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**, Earthscan Publications Ltd., 2008.

LOUÇÃO, I. **Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nematode de pinheiro, para produção de pellets**. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. 2008.

MADU, C. & SODEINDE, O.A. **Relevance of biomass in sustainable energy-development in Nigeria**. Proceedings of the National Engineering Conference and anual general meeting of the Nigerian Society of Engineers, p.220-7., 2001.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320p. (Coleção do Agricultor. Grãos).

MASTER GARDENER LANDSCAPING OF FORT LAUDERDALE. Tropical Plants Library Online – cacao. Karl Slatner, Owner, Fort Lauderdale, Florida, USA. Disponível em < [www.mgonlinestore.com/cacao/theobroma13.jpg](http://www.mgonlinestore.com/cacao/theobroma13.jpg) >, acesso em 17 de abril de 2014.

MALISIUS, U. **Wood Pellets in Europe** (2000). Industrial Network on Wood Pellets, Thermie B Project Dis/2043/98 – AT. Austria.2000.

MARQUES. **Viabilidade de incorporação de resíduos florestais e agrícolas para produção de pellets**. Dissertação. Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 2009.

---

MALTA, M. R.; CHAGAS, S. J. R.; OLIVEIRA, W.M. **Composição físico-química e qualidade do café submetido a diferentes formas de pré-processamento.** Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa-MG, v.6, p.37-41, 2003.

MATTOS, A.L.A., et al. **Relatório de avaliação dos impactos das tecnologias geradas pela Embrapa.** Produção de pó e fibra da casca de coco verde. Embrapa Agroindústria Tropical. Fortaleza. 2013.

MELO, F.A.O., *et al.*, **Avaliação da utilização da palha de café para o aproveitamento indireto de ar para secagem de produtos agrícolas.** Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.13, n.1, 49-54, jun/mar., 2005.

METCALF; EDDY. **Waste water engineering: treatment, disposal and reuse.** 4. ed. rev. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

MULLER, M.D. (2005). **Produção de Madeira para Geração de Energia Elétrica numa Plantação Clonal de Eucalipto**, MG. Viçosa, Minas Gerais – Brasil.

MUYLAERT, M.S. **Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta: Análise do Mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de Caso.** Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2000, 121 p.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, **Methane Generation from Human, Animal and Agricultural Wastes.** Washington D.C. , 1977.

NOGUEIRA, L.A.H e LORA, E.E.S. **Dendoenergia: fundamentos e aplicações - 2 ed.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

ODESOLA, I.F. & OWOSENI, T.A., **Development of Local Technology for a small – scale Biochar Production Processes from Agricultural Wastes.** Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)1(2): 205 – 208 Scholarlink Research Institute Journals, 2010 (ISSN:2141 – 7016). Mechanical Engineering Department, University of Ibadan, Ibadan, Nigéria.

---

OLIVEIRA, R.A.F., **A geração de energia elétrica através do uso de biomassa na bahia: condicionantes e oportunidades**. 2006, Dissertação. Universidade de Salvador, Salvador, 2006.

OLIVER, A. P.; NETO, A. A. S.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. **Training manual on biodigestion. USAID, Winrockinternational Brasil e Energia e desenvolvimento**. Brasil. Versão 2.0. Fevereiro, 2008. Disponível em: <http://www.winrock.org.br/media/>, 2012.

ORSINI, R.D.R, **Estudo do aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de biomassa na produção de hidrogênio**. 2012, Tese, Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.

PANDEY, A., SOCCOL, C.R., NIGAM, P., BRAND, D., MOHAN, R., ROUSSOS, S., **Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses**, 2000.

PARIS, C.M., **Implantação de biodigestor e produção de biofertilizante**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. 2010. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. 2010.

PATZA, E. **Aplicação de modelos matemáticos para a definição de parâmetros hidráulicos e cinéticos de tanques sépticos**. 2006, Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

PEREIRA, J.C.D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PERLINGEIRO, C.A.G., **Engenharia de processos – análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. Editora Blucher. 2005

PICANÇO, A.P. **Influência da recirculação do percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. 2004. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

---

PRADO, M.A.C; CAMPOS, C.M.M. Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos do processamento de *Coffea arabica* L. em reator anaeróbico UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café. **Departamento de Engenharia/DEG-Universidade Federal de Lavras/UFLA. Ciênc. Agrotec., Lavras**, v.32, n.3, p.938-937, maio/jun., 2008.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA, 2003. 14 p.

REIS, L. B., FADIGAS, E. A. F. A., CARVALHO, C. E., **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**, MANOLE, 2012.

RENDEIRO, G. *et al.*, **Combustão e gasificação de biomassa sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1ª Edição: Brasília, Ministério de Minas e Energia. 2008.

ROCHA, J. D., **Pré-Tratamento da Biomassa**. Palestra – Projeto: Programa de Pesquisa em Políticas Públicas – Painel 1. 2008.

ROSA, M.F., et al. Utilização da Casca de Coco como Substrato Agrícola. 24p. **Embrapa Agroindústria Tropical**. Documentos, 52. CDD 634.61. Fortaleza – CE. 2002.

RUSSO, M.A.T., **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, 2005.

SAIÃO, M.G.C. M., **Implementação de uma central a biomassa: análise de sustentabilidade ambiental e econômica**. Dissertação. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2009.

SEBRAE. Agroenergia (Coordenação: desenvolvido por Wang Hsiu Ching). Disponível em: <[www.sebrae.com.br/setor/agroenergia](http://www.sebrae.com.br/setor/agroenergia)> . Disponível em: 09 de abril de 2014.

SENHORAS, E. **Estratégia de uma Agenda para a Cadeia Agroindustrial do coco**. Campinas: ed. ESC, 2003.

---

SHARMA, S.K., MISHRA, I.M., SHARMA, M.P., SAINI, J.S., **Effect of Particle Size on Biogas Generation from Biomass Residues**, 1988.

SILVA, G.O. & JERÔNIMO, C.E. **Estudo de Alternativas para o aproveitamento de resíduos sólidos da indústria do Coco**. V.(10), nº10, p.2193-2208, OUT-DEZ 2012. (e- ISSN: 2236 – 1308)

SILVEIRA, M. S.. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete**. Dissertação. 2008. Universidade Federal da Bahia. Salvador - BA, 2008.

SOUSA, P.L.N., **Desenvolvimento Tecnológico do Aproveitamento Energético da Biomassa a Nível Industrial**. Dissertação. Instituto superior técnico. Universidade técnica de Lisboa. Lisboa – Portugal. 2009.

THEMELIS, N.J. & S. Verma (2004): “**The better option-Anaerobic digestion of organic wastes in MSW.**” Waste Management World, 2004.

TIENNE, L. et al. **produção de carvão e subprodutos da pirólise da casca e do bagaço da laranja (citrus sinensis)**. Revista Renabio, Biomassa e Energia, v.1, n.2, p.191 – 197, 2004.

TORSO & MINUTTI, **Análise e Perspectivas Ambientais Referentes às Aplicações da Biomassa como Fonte de Energia Alternativa**. Trabalho de Graduação Integrado. Unicamp. Limeira. SP – 2006.

TOCK, J.Y., et al. Banana biomass as potential renewable energy resource: A Malaysian case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 798 – 805, 2010.

VALE, A.T. do, GENTIL, L.V., GONÇALEZ, J.C., COSTA, A.F., Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de café (*coffea arabica*, l) e de madeira (*cedrelinga catenaeformis*), DUKE. **Cerne, Lavras**, v. 13, n. 4, p. 416-420, out./dez. 2007

VIRMOND, E., **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. Dissertação. 2007. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2007.

---

VISWANATH, P., et al. Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogás production. **Bioresource Technology**, v.40, p. 43 – 48, 1992.

VRIESMANN, L.C., **Pectinas da casca dos frutos do cacau (theobroma cacao l.): otimização da extração e caracterização**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Curitiba- 2012.

WANNAPEERA, J. *et al*, **Product yields and characteristics of rice husk, rice straw and corncob during fast pyrolysis in drop-tube/fixed-bed reactor**. **Songklanakarin, Journal of Science and Technology**. The Joint Graduate School of Energy and Environment King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tung Kru, Bangkok. Thailand, 2008.

WAUGH, T. **Waste management coffee industry board**. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE CAFICULTURA, 18., 1997, San José, Costa Rica. **Memorias...** San José: ICAFE/IICA, 1997. p. 403-407.

WERTHER, J., SAENGER, M., HARTGE, E. U., OGADA, T. E SIAGI, Z., **“Combustion of agricultural residues”, Progress in Energy and Combustion Science**, Vol. 26, pp 1- 27 (2000).

WIECHETECK, M., **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais. Alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. Sumário executivo - MMA - secretaria de biodiversidade e florestas - projeto pnud bra 00/20. Revisão 00 2009.

YADVIKA, SANTOSH, SCREEKRISHNAN, T.A., KOHLI, .S., RANA, V. **Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – a review**, 2004.

YANG, Y.B.; RYU, C.; KHOR, A. YATES, N.E.; SHARIFI, V.N.; SWITHENBANK, J. **Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach – identification of the controlling factors**. Fuel 84, p. 2116 – 2130, 2005.

ZANETTI, L. **Fontes alternativas de energia**, Universidade Norte do Paraná - UNOPAR. PREMIO INTEGRAÇÃO. Disponível em



---

<http://recyt.ibict.br/files/PremioMercosul/PremioIntegracao/TrabalhoIntegracao21.pdf>. Acesso em agosto de 2013.

[http://www.infobibos.com/Artigos/2011\\_3/EnergiaSolar/Index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2011_3/EnergiaSolar/Index.htm). Acesso em novembro de 2013.

[http://www.ceplac.gov.br/paginas/cbc/paginas/palestras/P7\\_3.pdf](http://www.ceplac.gov.br/paginas/cbc/paginas/palestras/P7_3.pdf). Acesso em 01 de setembro de 2013.

<http://www.esdb.bg> , 2013. Acesso em 15 de setembro de 2013.

[www.eubia.org](http://www.eubia.org) . Acesso em 8 de junho de 2013.

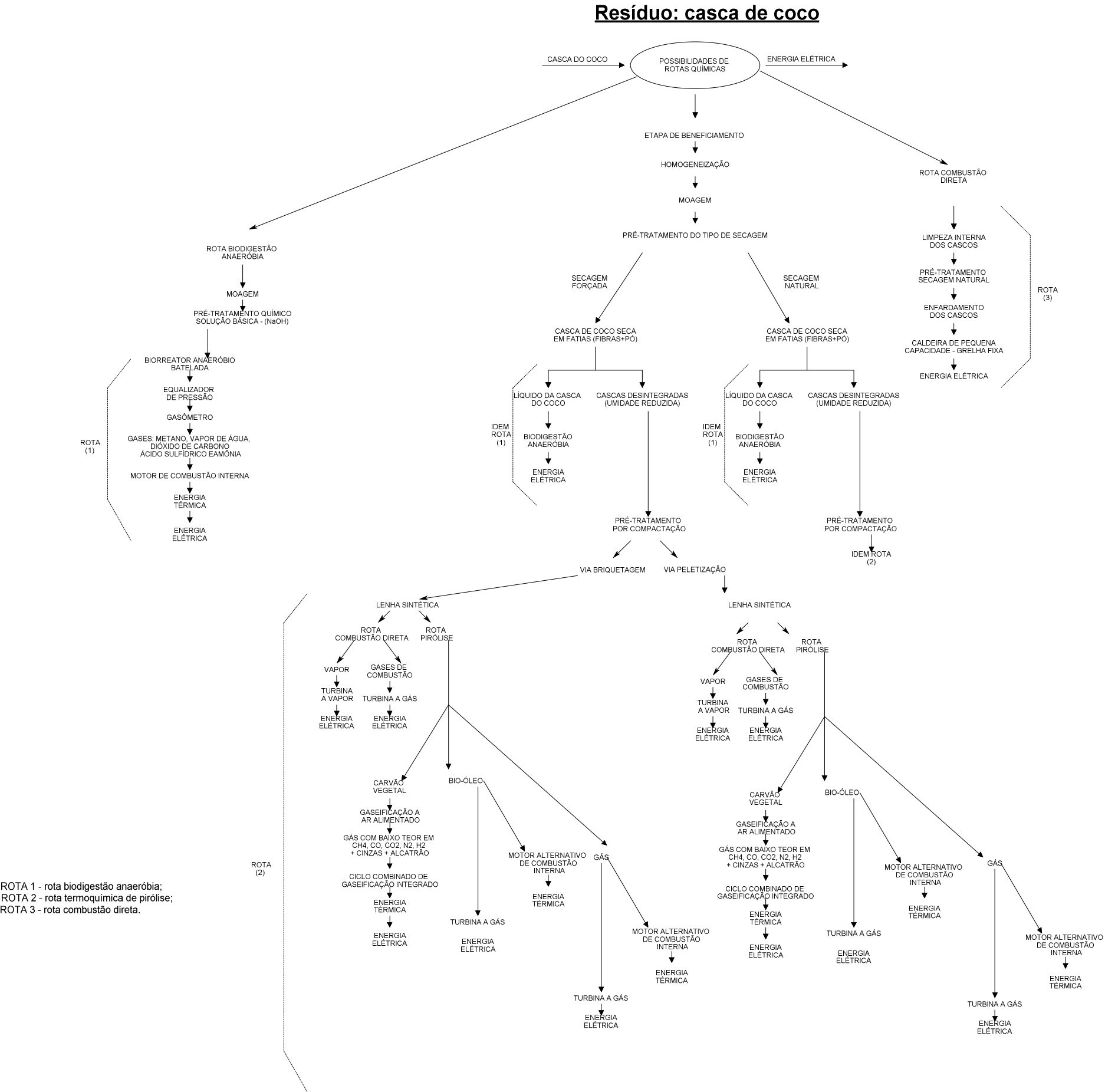
[http://www.redepeabirus.com.br/redes/form/post?post\\_pub\\_id=95876](http://www.redepeabirus.com.br/redes/form/post?post_pub_id=95876). Acesso em 19 de setembro de 2013.

<http://www.sebrae.com.br/setor/agroenergia>. Acesso em 28 de janeiro de 2014.

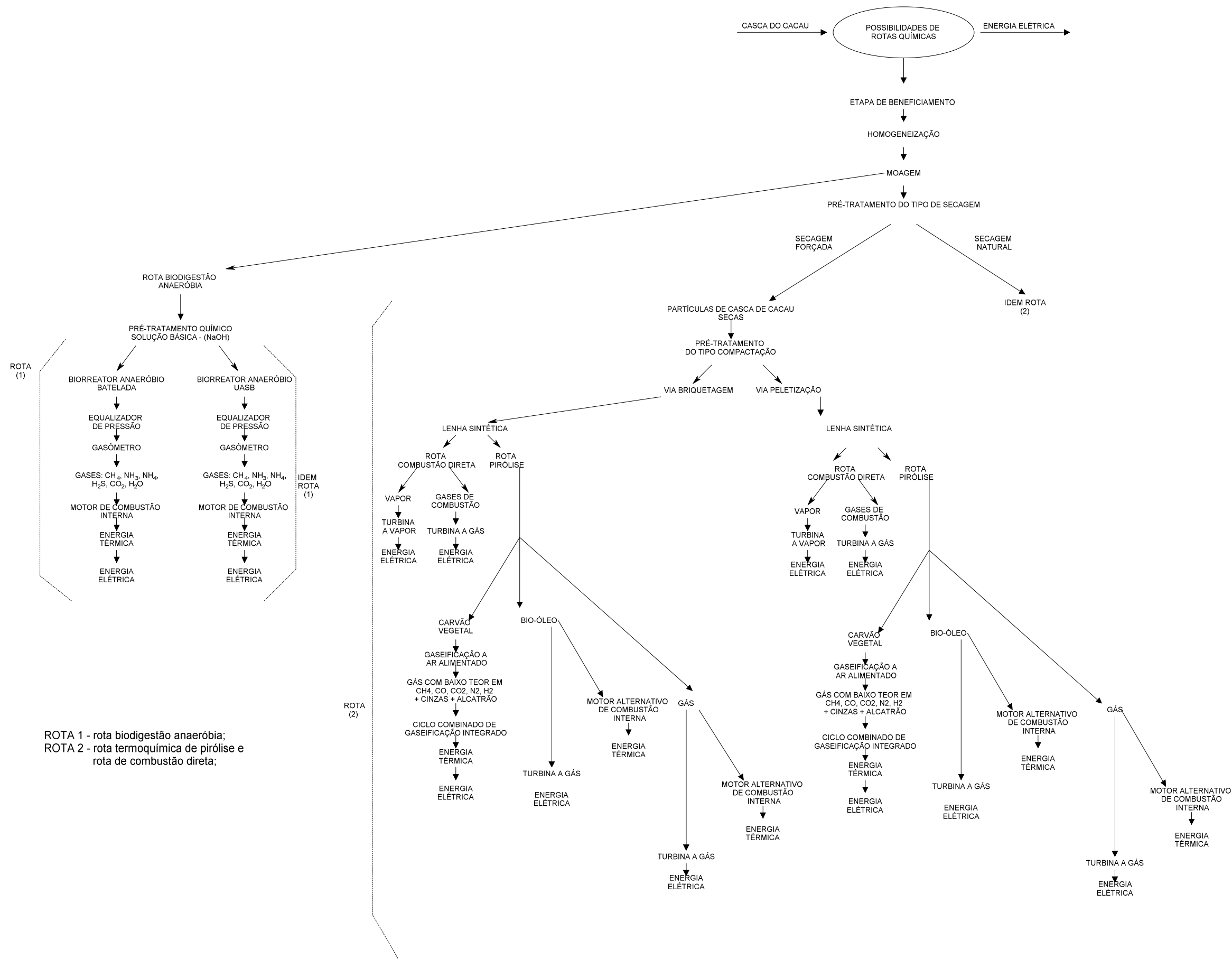
[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5\\_3.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5_3.htm). Acesso em: 09 abr. 2014.

<http://www.unicamp.br/unicamp/ju/552/processamento-de-casca-de-cafe-rende-aplicacoes>. Acesso em 17 de abril de 2014.

APÊNDICE



Resíduo: casca do cacau



**Resíduo: casca do café**

